



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Lauri Korhonen

## SOLUMUOVIERISTETTYJEN BETONIELEMENTTIEN KUIVUMIS- TARKASTELUT

Diplomityö

Tarkastaja: professori Juha Vinha  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
27. maaliskuuta 2017

## TIIVISTELMÄ

**KORHONEN LAURI:** Solumuovieristettyjen betonielementtien kuivumistarkastelut

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 86 sivua, 11 liitesivua

Helmikuu 2018

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Juha Vinha

**Avainsanat:** betoniseinät, kosteusmittaukset, kuivuminen

Betoniseinien lämmöneristämiseen on mahdollista käyttää kosteusteknisesti erilaisia eristemateriaaleja. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää solumuovieristettyjen betonielementtiseinien kuivumista. Tutkimuksessa selvitettiin myös erilaisten jatkuvatoimisten mittausten käyttöä betonin suhteellisen kosteuden mittauksissa.

Tutkimus suoritettiin koekappaleiden laboratoriomittauksin. Mittauksissa vertailtiin mineraalivilla-, EPS- ja PIR-lämmöneristeiden vaikutusta betonisisäkuorielementin kuivumiseen. Lisäksi erilaisten betonipinnan jälkihoitovaihtoehtojen vaikutusta kuivumiseen selvitettiin.

Laboratoriomittauksissa itse tehdyt betonielementtikoe-kappaleet asetettiin valun jälkeen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden osalta vakioituihin olosuhteisiin. Koekappaleiden kuivumista seurattiin erilaisin jatkuvatoimisin kosteusmittausmenetelmin ja mittausten tuloksia vertailtiin keskenään. Käytettävänä mittausten menetelminä olivat kahdet erityyppiset suhteellisen kosteuden mitta-anturit, koekappaleiden punnitseminen ja kapasitanssimittaukset. Lisäksi koekappaleille suoritettiin kokeiden päätteeksi porareikämittauksia.

Tutkimuksessa havaittiin mineraalivillalla eristetyt betonielementit kokonaiskuivuminen olevan nopeampaa kuin solumuovieristeillä eristettyjen betonielementtien. Elementtien kuivuminen koekappaleen eristämättömään pintaan havaittiin kuitenkin melko samanlaiseksi elementissä käytetystä eristemateriaalista riippumatta. Betonipinnan jälkihoitolla oli vaikutusta betonipinnan kosteuspitoisuuteen vielä pitkän ajan kuluttua valusta. Betonin tiivistäminen muottia vasten pidensi merkittävästi betonipinnan kuivumiseen kuluva aikaa.

Tutkimuksessa havaittiin suuria eroja eri kosteusmittausmenetelmien välillä. Etenkin korkean suhteellisen kosteuden alueella jatkuvatoimisten mittausten toteuttaminen havaittiin hyvin haasteelliseksi. Kapasitanssimittauksen soveltuminen betonin suhteellisen kosteuden mittaamiseen vaikuttaa tutkimustulosten perusteella mahdolliselta, mutta aihe vaatii jatkotutkimusta. Tutkimustuloksista käy ilmi myös jatkuvatoimisten suhteellisten kosteusmittausten luotettavuuden arviontiin liittyvät haasteet.

## ABSTRACT

**KORHONEN LAURI:** Drying examinations of prefabricated concrete walls insulated with cellular plastic

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 86 pages, 11 Appendix pages

February 2018

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Design

Examiner: Professor Juha Vinha

**Keywords:** concrete walls, moisture measurements, drying

Concrete walls can be insulated with materials with different hygrothermal properties. The main purpose of this study was to examine the drying of prefabricated concrete units insulated with three different types of thermal insulation materials. Mineral wool, EPS and PIR were the studied insulation materials. The study also researched how different types of concrete curing affects the drying of concrete surface. The use of continuous measuring of moisture in concrete structures were also studied.

The primary research method used in this study was self-made concrete test specimens, which were moisture metered in laboratory conditions using different types of moisture metering techniques. The used metering techniques were two types of relative humidity moisture meters, weighing and capacitance metering.

The study found that mineral wool insulation is able to pass more water vapor through than the studied cellular plastic insulation materials. However, drying through the uninsulated concrete surface was found quite similar with all the studied insulation materials. Different types of concrete curing were found to have an impact on the drying of the concrete surface for long time after the cast. Compacting the concrete against a mold was found to lengthen the needed drying time of the surface remarkably.

The study found great differences between different types of moisture metering techniques. The use of continuous moisture metering techniques were found challenging especially when high relative humidity. The research data shows that capacitance metering as a method for measuring relative humidity of concrete may be possible, but further research is needed. The problem of determining the reliability of relative humidity measurements in concrete as well as the contamination effects of relative humidity probes can be found in the results of this study.

## ALKUSANAT

Haluan kiittää professori Juha Vinhaa mielenkiintoisesta diplomityön aiheesta ja tarkastamisesta ja DI Eero Tuomista työni ohjaamisesta. Kiitän myös DI Pauli Sekkiä työn kommentoinnista. DI Kari Vääntistä haluan kiittää yhteisen diplomityömatkan kulkemisesta.

Veljeäni Tuomasta kiitän hyvistä neuvoista ja ulkopuolisesta näkemyksestä.

Erityiskiitokset haluan osoittaa koko perheelleni ja kaikille läheisilleni.

Tampereella, 27.02.2018

Lauri Korhonen

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tutkimuksen tausta .....	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet .....	2
1.3	Tutkimuksen suoritus .....	2
2.	RAKENNUSFYSIKAN TEORIAA .....	4
2.1	Ilmankosteus .....	4
2.2	Kosteus huokoisessa materiaalissa .....	5
2.3	Tasapainokosteus .....	9
2.4	Kosteuden siirtyminen huokoisessa materiaalissa .....	11
2.4.1	Yleistä .....	11
2.4.2	Kosteuden diffuusio .....	12
2.4.3	Kosteuden konvektio .....	13
2.4.4	Kapillaari-imu .....	14
2.4.5	Kosteuslähteet .....	15
2.5	Rakenteen kuivuminen .....	17
2.6	Ulkoseinärakenteiden kosteusteknisen toiminnan periaate .....	19
3.	BETONI JA KOSTEUSMITTAUKSET .....	20
3.1	Betoni .....	20
3.2	Betonirakenteen kuivumiseen vaikuttavat tekijät .....	21
3.3	Betonirakenteen pinnoittaminen ja kosteusvauriot .....	25
3.4	Kosteusmittaukset ja mittausmenetelmät .....	29
3.4.1	Ilman suhteellinen kosteus .....	29
3.4.2	Porareikämittaus rakenteesta .....	31
3.4.3	Näytepalamittaus rakenteesta .....	32
3.4.4	Pintakosteusmittaus rakenteen pinnalta .....	33
3.4.5	Valuun upotettavat anturit .....	34
3.4.6	Punnitus-kuivaus-menetelmä .....	34
3.4.7	Kapasitanssimittaus valettavissa materiaaleissa .....	35
3.4.8	Virhelähteiden arviointi kosteusmittauksissa .....	36
4.	MATERIAALIT JA KOEJÄRJESTELYT .....	38
4.1	Laboratoriotutkimuksen kuvaus .....	38
4.2	Tutkitut rakenteet ja koekappaleet .....	38
4.2.1	Betoni .....	40
4.2.2	Eristysmateriaalit .....	41
4.3	Käytetyt mittausmenetelmät ja mittausepävarmuudet .....	43
4.3.1	Punnitus .....	43
4.3.2	Kapasitiiviset kosteusanturit .....	44
4.3.3	Resistiiviset valuanturit .....	47
4.3.4	Kapasitanssimittaus .....	48
4.3.5	Porareikämittaus .....	49

4.3.6	Puristuslujuuden määrittäminen.....	51
4.4	Koekappaleiden valmistus ja säilytys .....	52
4.4.1	Esivalmistelut ja muotit .....	52
4.4.2	Valun suoritus ja betonipintojen käsittelyt.....	56
4.4.3	Koekappaleiden säilytys ja tarkastelu .....	58
4.5	Koejärjestelmän lisätarkastukset .....	61
4.5.1	Kapasitiivisten kosteusantureiden säätö ja kalibrointi .....	61
4.5.2	Tiivistykseen käytetyn silikonin vaikutus mittaustuloksiin .....	63
4.5.3	Mittaputkien syvyyden tarkistus .....	64
5.	TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	66
5.1	Punnitus.....	66
5.2	RH/T-anturit .....	68
5.2.1	Kapasitiiviset kosteusanturit .....	68
5.2.2	Resistiiviset valuanturit .....	71
5.2.3	Porareikämittaukset.....	73
5.2.4	Kapasitiivisten kosteusantureiden lopputarkistus .....	74
5.2.5	Silikonin vaikutus kapasitiivisiin kosteusantureihin .....	77
5.2.6	RH/T-anturien yhteenveto.....	78
5.3	Kapasitanssineulat .....	79
5.4	Puristuslujuus .....	83
6.	YHTEENVETO .....	84
6.1	Tulosten yhteenveto .....	84
6.2	Jatkotutkimustarpeet.....	85
6.3	Tutkimuksen onnistuminen .....	85
	LÄHTEET.....	87
	LIITTEET .....	90

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

A	pinta-ala	m <sup>2</sup>
C	kapasitanssi	F
D <sub>w</sub>	kosteusdiffusiviteetti	m <sup>2</sup> /s
G	kosteusvirta	kg/s
M	kaasun molekyylipaino	kg/kmol
M <sub>w</sub>	veden molekyylipaino	kg/kmol
RH	suhteellinen kosteus	%
T	lämpötila	°C, K
V	tilavuus	m <sup>3</sup>
Z <sub>v</sub>	vesihöyrynvastus	s/m
Z <sub>p</sub>	vesihöyrynvastus	m <sup>2</sup> sPa/kg
d	halkaisija, paksuus, korkeus, syvyys	m
g	kosteusvirran tiheys	kg/(m <sup>2</sup> s)
p	paine	Pa
p <sub>v</sub>	vesihöyryn osapaine	Pa
p <sub>v,sat</sub>	vesihöyryn kyllästysosapaine	Pa
r	(huokosen) säde	m
t	aika	s, h, d
w	vesipitoisuus	kg/m <sup>3</sup>
δ <sub>v</sub>	vesihöyrynläpäisevyys	m <sup>2</sup> /s
δ <sub>p</sub>	vesihöyrynläpäisevyys	kg/(mPas)
ε	permittiivisyys	F/m
ε <sub>r</sub>	suhteellinen permittiivisyys	-
ε <sub>p</sub>	huokoisuus	-
φ	suhteellinen kosteus	% RH
φ <sub>crit</sub>	kriittinen suhteellinen kosteus	% RH
μ	diffuusiovastuskerroin	-
v	vesihöyrynpitoisuus	kg/m <sup>3</sup>
v <sub>s</sub>	vesihöyrynpitoisuus sisäilmassa	kg/m <sup>3</sup>
v <sub>sat</sub>	vesihöyryn kyllästyskosteus	kg/m <sup>3</sup>
v <sub>u</sub>	vesihöyrynpitoisuus ulkoilmassa	kg/m <sup>3</sup>
ρ	tiheys	kg/m <sup>3</sup>
σ	veden pintajännitys	N/m
EPS	Paisutettu polystyreenimuovi (expanded polystyrene)	
PIR	Polyisosyanuraatti	
PUR	Polyuretaani	
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto	

## MÄÄRITELMÄT

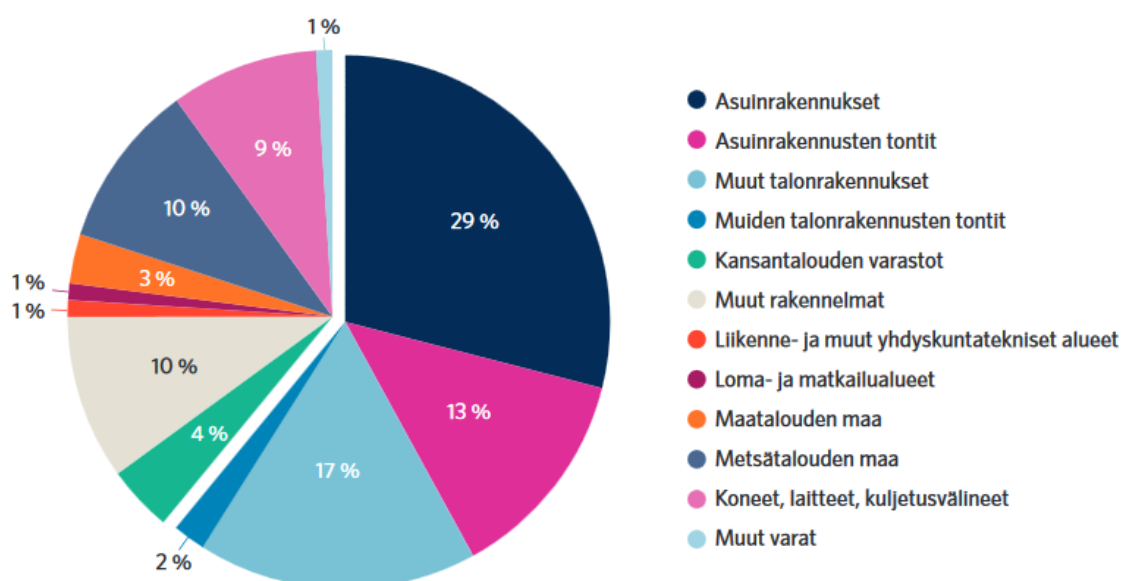
Absorptio	Molekyylien tai ionien imeytyminen aineeseen.
Adheesio	Kahden eri aineen molekyylien välinen vetovoima.
Adsorptio	Molekyylien tai ionien sitoutuminen aineen pinnoille.
Desorptio	Molekyylien poistuminen aineesta. Adsorption käänteisilmiö.
Diffuusio	Kaasumolekyylien liike, joka pyrkii tasoittamaan kaasuseoksessa olevia yksittäisen kaasun pitoisuuseroja.
Kosteus	Kemiallisesti sitoutumaton vesi eri olomuodoissa.
Kosteusdiffusiviteetti	Materiaaliominaisuus, joka kuvaa kosteuden siirtymistä materiaalissa sisältäen kaikki kosteuden siirtymismuodot.
Kosteuslähde	Rakennukseen tai rakenteisiin kosteutta tuottava tekijä.
Kosteuspitoisuus	Materiaalin sisältämä kosteus eri olomuodoissa ( $\text{kg/m}^3$ ).
Kuivuminen	Materiaalin sisältämän kosteuden poistumista materiaalista.
Rakennusaikainen kosteus	Rakennusmateriaaliin rakentamisvaiheessa sitoutuneen kosteuspitoisuuden ja rakennuksen käytön aikana tasapainotilan saavuttaneen kosteuspitoisuuden välinen erotus.
Vesisementtisuhde	Betonin valmistuksessa käytettävä suhdeluku (v/s-suhde), vesimäärä (kg) / sementtimäärä (kg).



# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Rakennukset ja tontit muodostavat 60 % Suomen kansallisvarallisuudesta (kuva 1.1). Loppuosa kansallisvarallisuudesta koostuu mm. koneista, maa- ja metsätaloudesta ja muista rakennelmista ja varoista. (SVT 2015)



**Kuva 1.1** Suomen kansallisvarallisuus (SVT 2015)

Asuinrakennusten ja asuntojen korjausrakentamiseen käytettiin Suomessa vuonna 2015 noin 6,7 miljardia euroa (SVT 2015). Kansallisvarallisuuden huolto ja ylläpito on tärkeää arvon säilyttämiseksi, mutta samalla myös merkittävä kuluerä. Kaikkea korjausrakentamista tuskin voidaan ehkäistä, mutta etenkin rakennus- ja rakennevirheistä johtuvien vaurioiden aiheuttamat korjaustarpeet voivat olla ennaltaehkäistävissä.

Rakennuksissa esiintyvistä vaurioista merkittävä osa on liiallisen kosteuspitoisuuden aiheuttamia (Lumme & Merikallio 1997). Rakennuksiin muodostuu liiallista kosteutta rakennuksen ulko- ja sisäpuolisista kosteuslähteistä ja rakennusaikaisesta kosteudesta. Rakennusaikainen kosteus on merkittävin kosteuslähde, johon voidaan rakennusvaiheessa vaikuttaa. Tästä syystä rakennusaikaisen kosteuden minimointi on taloudellisesti ja laadullisesti tärkeä asia. Rakennusaikaisen kosteuden määrää rakennuksessa voidaan arvioida laskennallisesti ja se voidaan määrittää rakennemittauksilla.

Betoni on maailman ja Suomen käytetyin rakennusmateriaali. Suomessa käytettävästä betonista noin puolet käytetään betonivalmisteiden valmistukseen. Suomessa on yli 100

betonielementtitehdasta ja betoniteollisuus työllistää suoraan noin 5000 ihmistä Suomessa. (Betonikeskus 2007)

Rakennusten ulkoseiniä valmistetaan betonista ja usein betoniset ulkoseinät tehdään betonielementteinä. Ulkoseinäelementit eristetään eristemateriaalilla lämmöneristysvaatimuksen täyttymiseksi. Tällä hetkellä Suomessa betonielementtien lämmöneristämiseen käytetään yleisesti mineraalivilloja ja enenevässä määrin erilaisia solumuoveja.

Solumuovien käyttö lämmöneristämisessä on edullista, sillä seinän kokonaisrakennepaksuus voidaan saada pienemmäksi kuin mineraalivillaa käyttämällä. Lämmöneristeiden kosteusteknisessä käyttäytymisessä on kuitenkin eroja.

Betonielementtien kuivumistarkasteluja on tutkittu TTY:llä aiemmin laskennallisesti. Laskennallisessa tarkastelussa on havaittu solumuovieristeiden heikentävän betonisisäkuoren kuivumista verrattuna mineraalivillaeristeisiin. (Ormiskangas 2009)

Rakennustyömailta saadun palautteen mukaan solumuovieristettyjen betonielementtien kuivuminen on ollut nopeampaa kuin mitä laskennalliset tarkastelut antavat olettaa. Tästä syystä TTY:llä päätettiin tehdä kokeellinen tarkastelu, jolla voidaan selvittää laskelmien paikkansapitävyyttä verrattuna mittaustuloksiin.

Tutkimus kuuluu TTY:llä vuonna 2015 alkaneeseen COMBI-hankkeen työpakettiin 3. Kyseisessä työpaketissa tutkitaan rakenneratkaisuja ja sisäilman olosuhteita.

## **1.2 Tutkimuksen tavoitteet**

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää solumuovimateriaaleilla eristettyjen betonisisäkuorielementtien kuivumista. Tutkimuksen päätavoitteeksi määritettiin:

1. Selvittää kolmen erilaisen eristemateriaalin vaikutus betonisisäkuoren kuivumiseen
2. Selvittää erilaisten jatkuvatoimisten mittausten käytön mahdollisuutta betonin kosteusmittauksissa

Tutkimuksen lisätavoitteita olivat kosteusmittausdatan kerääminen laskennallisia tarkasteluja varten, käytössä olleiden kapasitiivisten kosteusantureiden toiminnan selvittäminen ja betonielementtien pinnoituskosteuteen kuivumiseen kuluvan ajan määrittäminen.

## **1.3 Tutkimuksen suoritus**

Tutkimus koostuu kirjallisuuskatsauksesta ja kokeellisesta osiosta. Kirjallisuuskatsaus keskittyy rakennusfysikaalisiin kosteusrasituksiin ja kosteuden siirtymiseen materiaa-

lissa. Kirjallisuuskatsauksessa selvitetään myös Suomessa käytössä olevia kosteusmittausmenetelmiä, betonin kosteusteknisiä ominaisuuksia ja betonin kuivumiseen vaikuttavia tekijöitä.

Tutkimusosiossa käytetty koejärjestelmä esitellään, tulokset esitetään ja tulosten luotettavuutta ja koejärjestelmän virhelähteitä arvioidaan. Tuloksia verrataan kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin. Tutkimuksen kokeellisen osuuden suorittamista varten selvitettiin kirjallisuuden ja sähköpostikeskusteluiden avulla betonielementeissä käytetyn betonin ominaisuuksia.

Tutkimuksen kokeellinen osuus suoritettiin koekappaleiden laboratoriomittauksin. Koekappaleita tehtiin kolmella toisistaan kosteusteknisesti poikkeavilla eristemateriaaleilla eristettynä. EPS-eristeen avulla tutkittiin myös jälkieristämisen vaikutusta betonikappaleen kosteusprofiiliin. Samasta betonista valettiin myös erikseen koekappaleita valuvaiheen pintakäsittelyjen vaikutuksen vertailemiseksi.

## 2. RAKENNUSFYSIKAN TEORIAA

### 2.1 Ilmankosteus

Ilma on erilaisten kaasujen seos. Jokainen kaasu osaltaan vaikuttaa kokonaisilmanpaineeseen (Hagentoft 2001). Ilmankosteudella tarkoitetaan vesihöyryn määrää ilmassa, ja se voidaan ilmoittaa vesihöyrynpitoisuudella  $v$  ( $\text{kg/m}^3$ ), vesihöyryn osapaineena  $p_v$  (Pa) tai suhteellisenä kosteutena  $\varphi$  (% RH). Vesihöyryn osapaine  $p_v$  vesihöyrynpitoisuuden ja lämpötilan funktiona voidaan ilmoittaa (kaava 2.1):

$$p_v = 461.4 * v * (T + 273,15), \quad (2.1)$$

jossa  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) on tarkasteltava lämpötila ja  $v$  ( $\text{kg/m}^3$ ) vesihöyrynpitoisuus ilmassa.

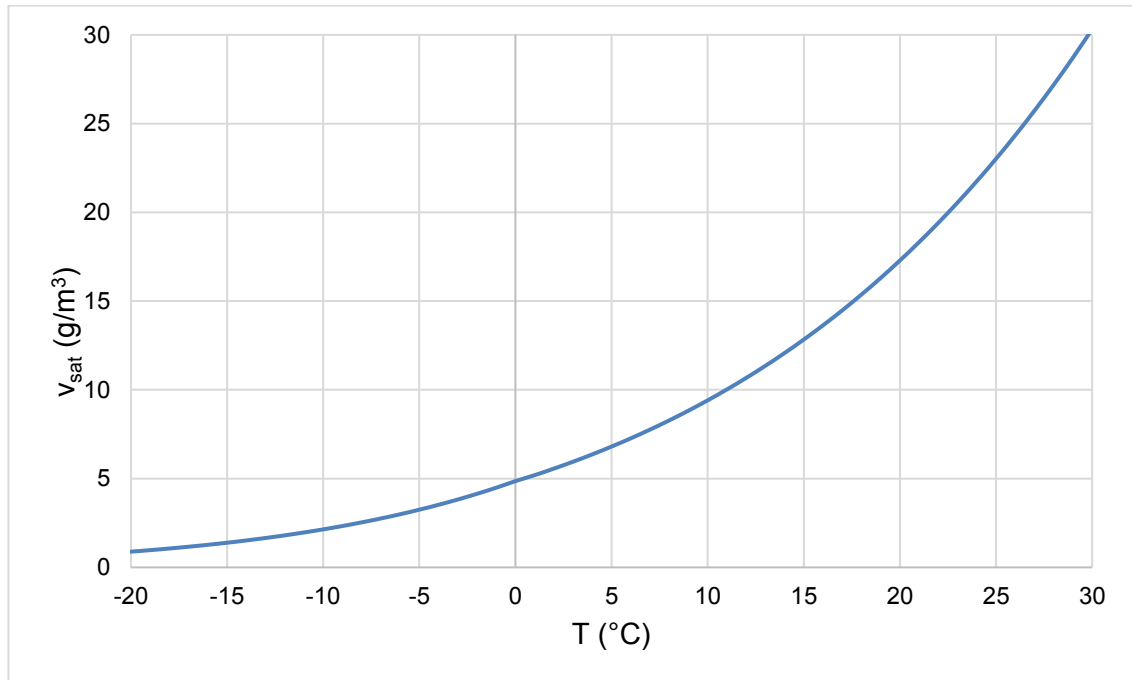
Vettä voi esiintyä samassa lämpötilassa sekä nestemäisessä olomuodossa että kaasuna. Veden olomuoto riippuu vallitsevasta veden osapaineesta. Kun ilma ei enää tietyssä lämpötilassa ja ilmanpaineessa kykene vastaanottamaan lisää vesihöyryä, puhutaan vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuudesta  $v_{sat}$  ( $\text{kg/m}^3$ ) tai kyllästysosapaineesta  $p_{v,sat}$  (Pa) (Nevander & Elmarsson 1994). Vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuuden ylityttyä ilmatilaan lisätty vesihöyry tiivistyy nestemäiseksi vedeksi. Vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuudelle on kirjallisuudessa (Ljungkrantz et al. 1994, Hagentoft 2001) esitetty joitakin lievästi toisistaan poikkeavia funktioita, joista voidaan käyttää (kaava 2.2) esimerkiksi saksalaisen DIN-standardin 4108-5 (1981) mukaista funktiota:

$$v_{sat} = \frac{a * (b + \frac{T}{100})^n}{461.4 * (T + 273,15)}, \quad (2.2)$$

jossa  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) on tarkasteltava lämpötila ja  $a$  (Pa),  $b$  (-) ja  $n$  (-) ovat lämpötilarajoista riippuvia kertoimia, joille voidaan Suomen ilmasto-olosuhteissa yleiselle tarkastelulämpötilalle ( $-20...+30$   $^{\circ}\text{C}$ ) antaa seuraavat arvot (kaava 2.3):

$$\begin{aligned} a &= 288.68 \text{ Pa}, b = 1.098, n = 8.02, \\ &\quad \text{kun } 0^{\circ}\text{C} \leq T \leq +30^{\circ}\text{C} \\ a &= 4.689 \text{ Pa}, b = 1.486, n = 12.3, \\ &\quad \text{kun } -20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 0^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Kaavoilla 2.2 ja 2.3 määritetty vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus lämpötilan funktiona on esitetty kuvassa 2.1.



**Kuva 2.1** Vesihöyryn kyllästyskosteus lämpötilan funktiona kaavojen 2.2 ja 2.3 mukaan

Suhteellinen kosteus  $\varphi$  (% RH) tarkoittaa ilmassa olevan vesihöyrypitoisuuden suhdetta saman lämpötilan vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuuteen (tai vesihöyryn osapaineen suhdetta kyllästyskosteuspitoisuutta vastaavaan osapaineeseen). Suhteellinen kosteus ilmaistaan useimmiten prosenttilukuna (kaava 2.4):

$$\varphi = \frac{v}{v_{sat}(T)} * 100 \% = \frac{p_v}{p_{v,sat}(T)} * 100 \% , \quad (2.4)$$

jossa  $v$  (kg/m³) on vesihöyryn pitoisuus ja  $v_{sat}$  (kg/m³) on vesihöyryn kyllästyskosteuspitoisuus tarkasteltavassa lämpötilassa. Termit  $p_v$  (Pa) ja  $p_{v,sat}$  (Pa) ovat vastaavat termit vesihöyryn osapaineen avulla ilmaistuna.

## 2.2 Kosteus huokoisessa materiaalissa

Huokoinen materiaali tarkoittaa materiaalia, jonka kokonaistilavuus koostuu kaasu- tai nestetäytteisistä huokosista ja kiinteästä aineesta (kuva 2.2). Rakennusmateriaalit ovat suurimmaksi osaksi huokoisia materiaaleja. Tästä ryhmästä poikkeuksen tekee kuitenkin esimerkiksi metallit, joiden tiiviiseen molekyylirakenteeseen ei mahdu sitoutumaan vesimolekyyleja (Pentti & Hyypöläinen 1999). Huokoisuus  $\epsilon_p$  (-, %) voidaan ilmoittaa (kaava 2.5):

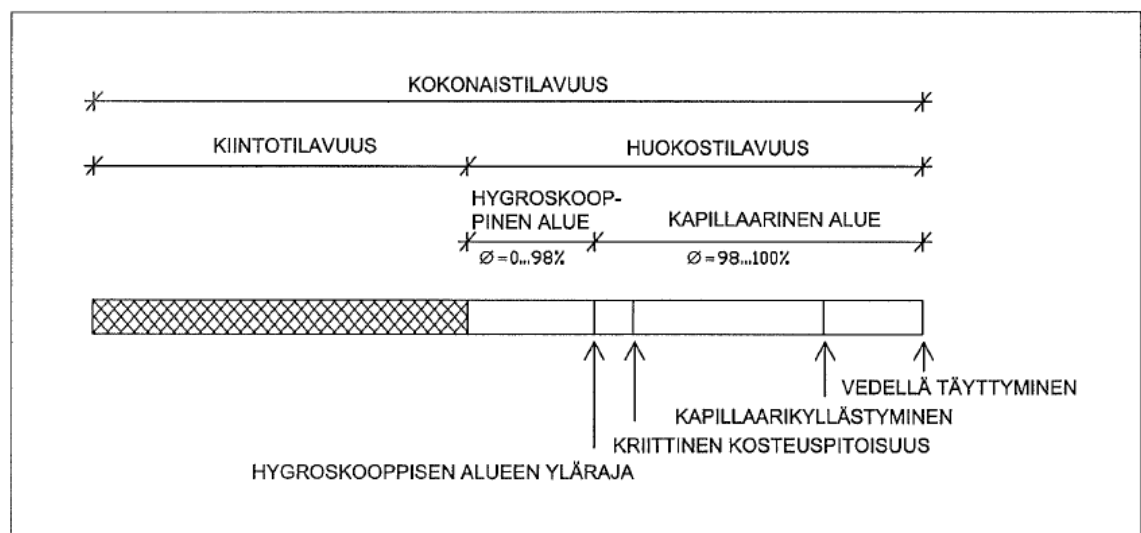
$$\varepsilon_p = \frac{V_p}{V_m} = \frac{V_p}{V_m} * 100 \% , \quad (2.5)$$

Jossa  $V_p$  (m<sup>3</sup>) on huokosten tilavuus ja  $V_m$  (m<sup>3</sup>) on kokonaistilavuus. Huokoisuus vaihtelee rakennusmateriaaleilla suuresti (taulukko 2.1).

**Taulukko 2.1** Joidenkin rakennusmateriaalien huokoisuuksia (Nevander & Elmarsson 1994)

Materiaali	Huokoisuus (%)
Betoni C32/40	14
Tiili	36
Puu	65
Mineraalivilla	98
EPS	98

Materiaalin kosteusteknisiin ominaisuuksiin vaikuttaa huokoisuuden lisäksi huokosten koko, muoto, määrä ja huokosverkon jatkuvuus (Pentti & Hyypöläinen 1999). Näin ollen huokoisuus yksinään ei ole suoraan verrannollinen materiaalissa siirtyvän ja sitoutuvan kosteuden ominaisuuksiin. Esimerkiksi mineraalivillan huokoisuus on yhtä suuri kuin paisutetun polystyreenin (EPS), mutta niiden kosteustekniset ominaisuudet poikkeavat toisistaan merkittävästi. Mineraalivillan vesihöyrynläpäisevyys on jopa 25-kertainen EPS:n verrattuna (Laine 2010, (RIL-255-1-2014)). Huokoisuus määrittää kuitenkin teoreettisesti käytössä olevan maksimaalisen vesimäärän, joka materiaaliin pystyy sitoutumaan. Normaaliolosuhteissa tätä maksimaalista vesimäärää ei kuitenkaan saavuteta (kohta 2.3).

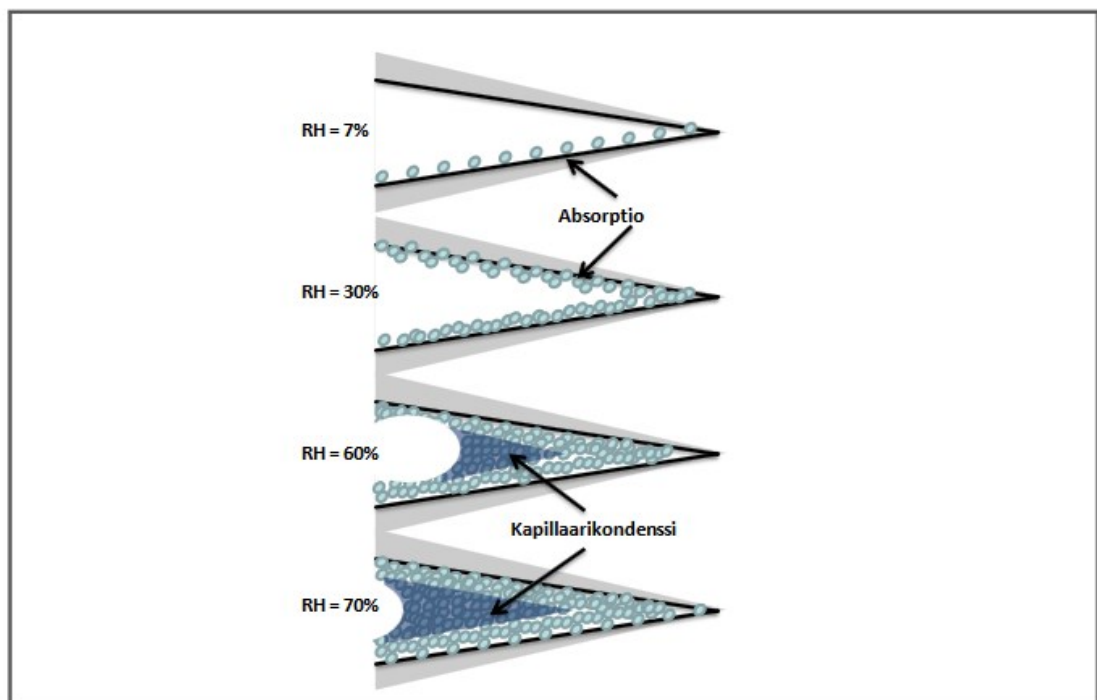


**Kuva 2.2** Kosteus huokoisessa materiaalissa (Pentti & Hyypöläinen 1999)

Kosteus on huukoisessa materiaalissa sekä kemiallisesti että fysikaalisesti sitoutunutta. Kemiallisesti sitoutuneeksi vedeksi luetaan esimerkiksi betonin hydratoitumisvesi ja kip-sin kidevesi. Tällä tavalla sitoutunut vesi on osa materiaalia, jolloin se ei ole normaaliolosuhteissa siirtymiskykyistä. Kemiallisesti sitoutunut vesi ei höyrysty materiaalin ollessa +105 °C lämpötilassa. (Björkholtz 1990)

Fysikaalisesti sitoutunut vesi on sitoutuneena materiaalin huokosverkoston pinnoille ja/tai huokostilaan. Tällä tavalla sitoutunut vesi on vapaata, siirtymiskykyistä vettä. Fysikaalisesti sitoutuneeksi vedeksi luetaan adsorptiovesi ja kapillaarisesti sitoutunut vesi. Lisäksi orgaanisilla materiaaleilla kosteus voi sitoutua osmoottisesti (Leivo & Rantala 2002). Huokostilassa olevaa vesihöyryä ei varsinaisesti lueta sitoutuneeksi vedeksi, sillä sen on mahdollista liikkua materiaalin huokosverkostossa. (Pentti & Hyypöläinen 1999)

Adsorptiossa vesimolekyylit sitoutuvat heikoilla van der Waalsin sidoksilla materiaali-huokosen seinämään (kuva 2.3). Alhaisessa suhteellisessa kosteudessa pintaan muodostuu yksi kerros vesimolekyylejä (monomolekylaarinen adsorptio) ja suhteellisen kosteuden kasvaessa kerroksia muodostuu lisää (polymolekylaarinen adsorptio). (Hagentoft 2001)

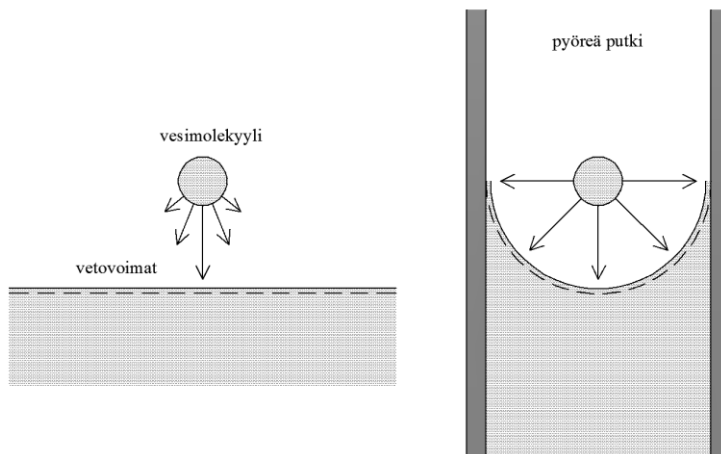


**Kuva 2.3** Veden sitoutuminen huokosen seinämään (Merikallio 2009)

Huokostilan suhteellisen kosteuden edelleen kasvaessa huokosiin alkaa muodostua kapillaarikondensssia. Kapillaarikondenssissa vesi tiivistyy koheesion ja pintajännityksen ansiosta nestemäiseksi vedeksi. Kosteus alkaa ensimmäiseksi tiivistyä materiaalin pieniin huokosiin ja vähitellen suuremmatkin huokokset täyttyvät. Kapillaarikondenssin vaikutus

huokostilan kokonaisvesimäärään on useimmilla materiaaleilla merkittävästi suurempi kuin adsorptiolla sitoutunut vesi. (Nevander & Elmarsson 1994)

Kapillaarikondenssi syntyy, koska koveran vesipinnan ja vesimolekyylin välinen vetovoima on suurempi kuin suoralla vesipinnalla (kuva 2.4). Kapillaarikondenssi alkaa tapahtua jo ennen kuin materiaalin huokostila saavuttaa 100 % suhteellisen kosteuden. Se, missä suhteellisessa kosteudessa kondenssia alkaa tapahtua, riippuu mm. huokosen koosta. Thomsonin teoreettinen kaava (kaavat 2.6 ja 2.7) esittää, mitkä tekijät vaikuttavat kapillaarikondenssin syntymiseen:



**Kuva 2.4** Vesimolekyylin ja pinnan väliset vetovoimat (kuva perustuu lähteeseen (Nevander & Elmarsson 1994))

$$\varphi = e^{-k}, \quad (2.6)$$

$$k = \frac{2 * \sigma * M_v}{r * \rho_w * R * T}, \quad (2.7)$$

jossa  $\sigma$  (N/m<sup>2</sup>) on veden pintajännitys,  $M_v$  (18,016 g/mol) on veden moolimassa,  $r$  (m) on tarkasteltavan huokosen säde,  $\rho_w$  (1000 kg/m<sup>3</sup>) on veden tiheys,  $R$  (8,314 J/K·mol) on kaasuvakio ja  $T$  (K) on lämpötila.

Kun Thomsonin kaavaan sijoitetaan luonnonvakiot, ja lämpötila vakioidaan, voidaan huokosen koon ja suhteellisen kosteuden välistä yhteyttä tarkastella (taulukko 2.2)



**Taulukko 2.2** Kapillaarikondenssin muodostumiseen vaadittava suhteellisen kosteuden lukuarvo huokosen halkaisijan suhteen (Nevander & Elmarsson 1994)

Halkaisija (nm)	Suhteellinen kosteus (% RH)
1	10
3	47
10	80
30	93
100	98
300	99,1
1000	99,8

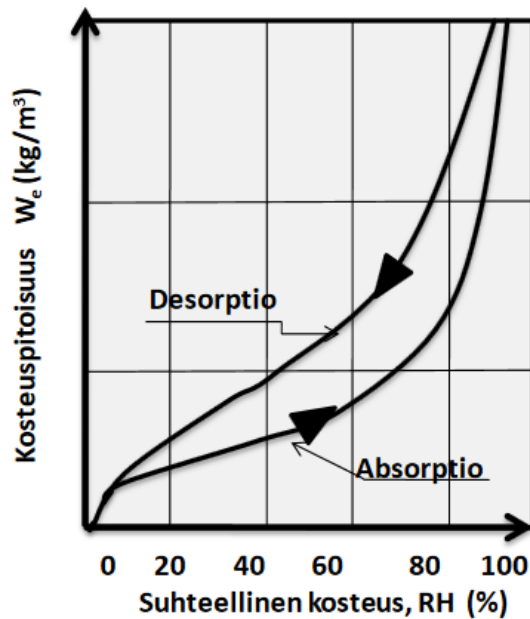
Huokosen halkaisijan kasvaminen suurentaa kapillaarikondenssin muodostumiseen vaadittavaa huokostilan suhteellista kosteutta merkittävästi. Vaikka rakennusmateriaalin huokokset eivät olekaan tasalaatuisia pyöreitä putkia, voidaan kapillaarikondenssin muodostumisen olettaa pätevän periaatteeltaan myös niihin. (Nevander & Elmarsson 1994)

## 2.3 Tasapainokosteus

Tasapainokosteus tarkoittaa materiaalin tasaantumista ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden kanssa. Tasapainokosteuden käsittelemiseen on teorian ja tutkimusmenetelmien vuoksi tehty keinotekoinen jako. Tästä syystä materiaalin tasapainokosteudella tarkoitetaan usein hygroskooppista tasapainokosteutta tai kapillaarista tasapainokosteutta.

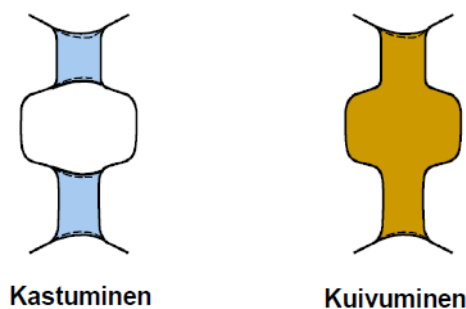
Huokoisen materiaalin ollessa huonetilassa, jossa sekä suhteellinen kosteus että lämpötila ovat vakioita, materiaalin lämpötila ja huokosilman suhteellinen kosteus tasapainottuvat ajan kuluessa huonetilan ominaisuuksia vastaaviksi. Tätä ympäröivän ilmatilan kanssa tasapainotilan saavuttanutta tilaa kutsutaan materiaalin hygroskooppiseksi tasapainokosteudeksi. Eri materiaalien hygroskooppisuus vaihtelee huomattavasti. Esimerkiksi puu voi sitoa ilmasta hygroskooppista kosteutta jopa  $150 \text{ kg/m}^3$ , kun taas tiili vain  $30 \text{ kg/m}^3$  (Nevander & Elmarsson 1994). Yleisesti ottaen, mitä pienempihuokoinen materiaali on kyseessä, sitä enemmän se voi sitoa hygroskooppista kosteutta (Ljungkrantz et al. 1994).

Kun materiaalin annetaan tasoittua samassa lämpötilassa useampaan eri suhteellisen kosteuden arvoon, voidaan materiaalille luoda hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä eli sorptiokäyrä (kuva 2.5). Sorptiokäyrän y-akselilla on materiaalin kosteuspitoisuus  $w$  ( $\text{kg/m}^3$ ) ja x-akselilla on suhteellinen kosteus  $\phi$  (% RH). (Nevander & Elmarsson 1994)



**Kuva 2.5** Sorptiokäyrät (Merikallio 2009)

Sorptiokäyrä luodaan erikseen sekä materiaalin kuivumiselle (desorptio) että kastumiselle (adsorptio). Sorptiokäyriille ominaista on hystereesi. Hystereesi tarkoittaa adsorptio- ja desorptiokäyrien välistä erotusta. Hystereesin on esitetty johtuvan siitä, että suurempien huokosten on mahdollista pysyä ilmatäytteisinä adsorptiossa, kun taas desorptiossa niiden oletetaan olevan vesitäytteisiä (kuva 2.6). Tällöin materiaalin hygroskooppisella adsorptiokäyrällä huokostilaa ei koskaan saada kokonaan täytettyä vedellä, ja materiaalin vesipitoisuus jää vastaavan suhteellisen kosteuden desorptiokäyrän arvoa pienemmäksi. (Nevander & Elmarsson 1994)



**Kuva 2.6** Huokosen vesitäytteisyys kastumisvaiheessa ja kuivamisvaiheessa (Vinha 2011)

Hystereesin takia sorptiokäyrän luomista varten on olennaista tietää kuivatetaanko vai kostutetaanko kappaletta, ja kosteuden muutossuunta on pidettävä samana koko tarkastelujakson. Mikäli ei ole tiedossa onko materiaalin kosteudenmuutossuunta adsorptio- vai desorptiotilassa, muuttuu materiaalin kosteuspitoisuuden tarkasteleminen haastavaksi etenkin materiaaleilla, joilla hystereesi on suuri (Nevander & Elmarsson 1994).

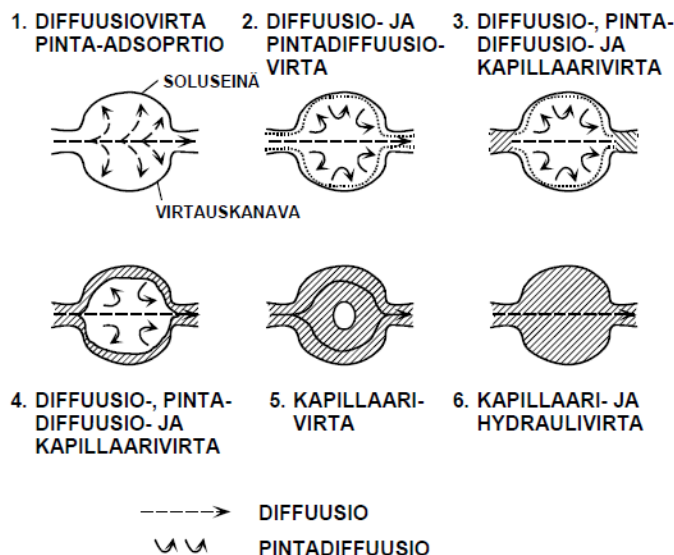
Hygroskooppinen tasapainokosteuskäyrä voidaan rakennusmateriaaleille määrittää välillä 0...98 % RH (Hagentoft 2001). Tätä suuremmilla suhteellisen kosteuden arvoilla pienikin ilmanpaineen tai lämpötilan vaihtelu voi johtaa vesihöyryn kyllästyskosteuspi-toisuuden hetkelliseen ylittymiseen ja se aiheuttaa kondenssia tutkittavan materiaalin pin-noille. Tästä syystä korkeissa suhteellisissa kosteuksissa systeemi ei ole stabiili. Näin ol-len alueella 98-100 % RH tasapainokosteuskäyrän pisteiden määrittämistä varten on käy-tettävä erilaista menetelmää. Tällainen menetelmä on esimerkiksi painelevylaitteisto. ((RIL-255-1-2014))

Kapillaarinen tasapainokosteus  $w_{cap}$  ( $\text{kg/m}^3$ ) voidaan määrittää materiaalin ollessa koske-tuksessa vapaan veden kanssa. Tasapainokosteus saavutetaan, kun vapaasta vesipinnasta ei enää imeydy lisää vettä materiaaliin. Kuten hygroskooppinenkin tasapainokosteus, myös kapillaarinen tasapainokosteus vaihtelee eri materiaaleilla.

## 2.4 Kosteuden siirtyminen huokoisissa materiaaleissa

### 2.4.1 Yleistä

Huokoisilla materiaaleilla on kyky luovuttaa ja vastaanottaa kosteutta. Kosteus voi siirtyä sekä vesihöyrynä että nestemäisenä vetenä (Hagentoft 2001). Usein vesi siirtyy kappa-leessa yhtä aikaa usealla eri tavalla (kuva 2.7). Materiaalissa vallitsee ympäristönsä suh-teen aina jokin seuraavista tiloista: kuivuminen (desorptio), kostuminen (adsorptio) tai tasapaino (Pentti & Hyypöläinen 1999).



**Kuva 2.7** Adsorption vaiheet (Vinha 2011)

Erilaisia kosteuden siirtymismuotoja ovat esimerkiksi:

- Kosteuden diffuusio

- Kosteuden konvektio
- Kapillaari-imu
- Paineenalainen kosteuden siirtyminen
- Painovoimainen kosteuden siirtyminen

*Kosteuden diffuusio* tarkoittaa vesihöyrymolekyylien pitoisuuserojen tasoittumista. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että molekyylit siirtyvät suuremmasta pitoisuudesta pienempään. *Kosteuden konvektio* tarkoittaa vesimolekyylien siirtymistä väliaineen, usein ilma- virtauksen, mukana. *Kapillaari-imu* johtuu huokosalipaineen aikaansaamasta veden imeytymisestä huokoseen. *Paineenalainen kosteuden siirtyminen* tarkoittaa veden siirtymistä ulkoisen paine-eron vaikutuksesta. *Painovoimainen kosteuden siirtyminen* tarkoittaa veden siirtymistä putoamiskiihtyvyyden (painovoiman) vaikutuksesta. Kosteuden siirtymismuotoja on käsitelty tarkemmin luvuissa 2.4.2-2.4.4.

Kokonaiskosteusvirtaa merkitään tunnuksella  $G$  (kg/s) ja kosteusvirran tiheyttä tunnuksella  $g$  (kg/(m<sup>2</sup>s)). Kosteusvirran tiheys  $g$  voidaan ilmaista vektorina (kaava 2.8):

$$\mathbf{g} = (g_x, g_y, g_z), \quad (2.8)$$

jossa  $g_x$ ,  $g_y$  ja  $g_z$  ovat x-, y-, ja z-akselien suuntaiset kosteusvirtavektorit. Kosteusvirran suuruus  $G$  (kg/s) (vektorin  $g$  pituus) voidaan laskea (kaava 2.9):

$$|G| = \sqrt{(g_x^2 + g_y^2 + g_z^2)}, \quad (2.9)$$

Homogeenisten kerrosten muodostamia rakennetyyppejä tarkasteltaessa riittää usein kosteusvirran tarkastelu yksiulotteisessa tapauksessa, jolloin kosteusvirtaa ei käsitellä vektorisuureena. Tällainen rakennetyyppi on usein esimerkiksi maanvarainen betonirakenteinen alapohja. Liitosten, epähomogeenisten rakennekerrosten ja muiden epäjatkuvuuskoh- tien mallintaminen tulee kuitenkin tehdä moniulotteisesti, jotta laskentamalli vastaa to- dellisuutta.

## 2.4.2 Kosteuden diffuusio

Diffuusiassa ilman vesimolekyylit siirtyvät suuremmasta pitoisuudesta pienempään ts. kosteuspitoisuudet pyrkivät tasoittumaan. Stationääritilanteessa Fickin lain (kaava 2.10) mukaan diffuusion avulla tapahtuva kosteusvirran tiheys  $g$  voidaan määritellä seuraavasti:

$$g = D_w \cdot (v_1 - v_2)/d, \quad (2.10)$$

jossa  $D_w$  (m<sup>2</sup>/s) on ilman kosteusdiffusiviteetti (25·10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, +20 °C lämpötilassa),  $d$  (m) on tarkasteltavan kerroksen paksuus ja  $v_1$  sekä  $v_2$  (kg/m<sup>3</sup>) ovat tarkasteltavan ilmatilan eri puolilla vallitsevat vesihöyrypitoisuudet. Useinkaan tilanne ei ole stationäärinen, vaan eri

ominaisuudet tarkasteltavassa tilanteessa muuttuvat. Fickin 1. laki ilmaistaankin perusmuodossaan (kaava 2.11)

$$g = -D \cdot \frac{dv}{dx}, \quad (2.11)$$

jossa  $D$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) on ilman vesihöyrynläpäisevyys ja termi  $dv/dx$  on gradientti, joka kuvaa höyrynpitoisuuden muutosta virtauksen pituussuunnassa. Gradientti on tässä tapauksessa virtauksen  $g$  aikaansaava voima. Rakennusteknisissä tarkasteluissa tutkitaan huokoisen materiaalin ominaisuuksia, jolloin ei voida käyttää pelkästään ilman vesihöyrynläpäisevyyttä. Ilman vesihöyrynläpäisevyyden johdannaissuure materiaalin vesihöyrynläpäisevyys  $\delta_v$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) voidaan ilmoittaa (kaava 2.12):

$$\delta_v = \frac{D}{\mu}, \quad (2.12)$$

jossa  $\mu$  (-) on diffuusiovastuskerroin. Vesimolekyylien siirtyminen diffuusion avulla on suhteellisen hidasta, sillä se perustuu vesimolekyylien sattumanvaraiseen törmäilyyn. (Hagentoft 2001)

*Pintadiffuusio* on diffuusion muoto, jossa vesimolekyylit siirtyvät heikentyneen sidosvoiman ”ansioista” kappaleen huokosissa enemmän vesimolekyyliä sisältävästä kohdasta vähemmän vesimolekyyliä sisältävään kohtaan. Tällöin vesimolekyylit eivät ole varsinaisesti vapaassa huokostilassa, vaan hetkittäin huokosen eri kohtiin sitoutuneena. (RIL-255-1-2014)

Diffuusioksi lukeutuvia vesimolekyylien siirtymismuotoja ovat myös *termodiffuusio* ja *effuusio*. Effuusiolla eli Knudsenin molekyyliliikkeellä tarkoitetaan makroskooppista virtausta, joka syntyy molekyyliden törmätessä toisiinsa ja huokosseinämiin. Termodiffuusiolla tarkoitetaan vesimolekyylien siirtymistä lämpötilagradientin mukaisesti suurenevaa lämpötilaa kohti. Effuusion ja termodiffuusion merkitys on rakennusfysikaalisissa tarkasteluissa vähäinen (Björkholtz 1987). (Leivo & Rantala 2000)

### 2.4.3 Kosteuden konvektio

Kosteuden konvektiossa vesihöyrymolekyylit siirtyvät väliaineen (usein ilmavirtauksen) kuljettamina. Jotta ilmavirtaus voi muodostua, tarvitaan paine-ero. Paine-ero voi muodostua lämpötilaerojen aiheuttamista tiheysseroista (luonnollinen konvektio) tai ulkopuolisen voiman aiheuttamana (pakotettu konvektio). Pakotettua konvektiota tapahtuu esimerkiksi tuulen tai ilmanvaihtojärjestelmän kuljettaessa ilmaa. Konvektiovirtaus voi myös muodostua joko rakenteen sisälle, tai rakenteen toiselta puolelta toiselle (Pentti & Hyypöläinen 1999). (Nevander & Elmarsson 1994, Vinha 2008)

Kosteuden konvektiota tapahtuu rakennuksen pinnoilla käytännössä aina (Van Belleghem et al. 2014). Konvektio mahdollistaa lisäksi rakojen kautta tapahtuvan kosteuden siirtymisen, sillä ulkovaipan eri puolilla vallitsee rakennuksessa usein eri paine. Virtauksessa siirtyvä kosteus määrä  $G$  (kg/s) voidaan esittää (kaava 2.13):

$$G = v \cdot R, \quad (2.13)$$

jossa  $v$  (kg/m<sup>3</sup>) on virtaavan aineen vesihöyrypitoisuus ja  $R$  (m<sup>3</sup>/s) on ilman tilavuusvirta.

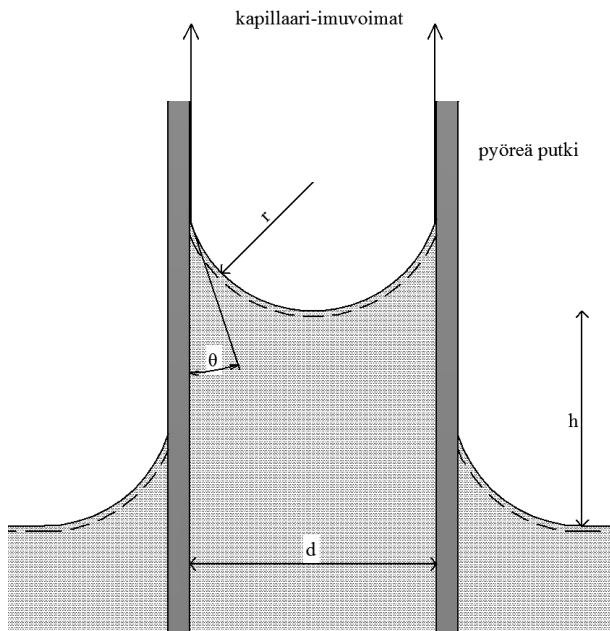
Laminaarinen ilman tilavuusvirta huokoisessa materiaalissa voidaan laskea Darcyn lailla (kaava 2.14):

$$R = A \cdot \frac{k}{\eta} \cdot \frac{dp}{dx}, \quad (2.14)$$

jossa  $A$  (m<sup>2</sup>) on pinta-ala,  $k$  (m<sup>2</sup>) on permeabiliteetti  $dp$  (Pa) on kokonaispaine-ero,  $\eta$  (Ns/m<sup>2</sup>) on dynaaminen viskositeetti. Dynaaminen viskositeetti riippuu tarkasteltavan virtauskohdan ominaisuuksista, kuten reiän muodosta, koosta ja pituudesta.

#### 2.4.4 Kapillaari-imu

Kapillaari-imu tarkoittaa huokoisessa materiaalissa olevan kosteuden siirtymistä kapillaarisen imuvoiman vaikutuksesta (kuva 2.8). Kapillaari-imuvoima (tai kapillaaripaine, huokosalipaine) on seurausta huokosen ja veden välisestä adheesiosta ja veden pintajännityksestä (Hagentoft 2001). Kapillaarinen kosteuden siirtyminen edellyttää materiaalilta sopivaa huokoskokoa ja yhtenäistä huokosverkostoa (Vinha et al. 2005).



**Kuva 2.8** Veden kapillaari-imu huokosessa (kuva perustuu lähteeseen (Nevander & Elmarsson 1994))

Pystysuoran pyöreän putken kapillaaripaine  $p$  (N/m<sup>2</sup>) voidaan määrittää kaavalla (2.15) (Nevander & Elmarsson 1994):

$$p = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \cdot \cos(\theta), \quad (2.15)$$

jossa  $\sigma$  (N/m) on veden pintajännitys,  $r$  (m) on meniskuksen säde,  $\theta$  (°) on kontaktikulma veden ja putken välillä. Veden ja useimpien huokoisten rakennusmateriaalien välinen kontaktikulma  $\theta = 0^\circ$  ja näin ollen  $\cos(\theta) = 1$ .

Kapillaarinen nousukorkeus on se korkeus, jossa kapillaaripaineen aiheuttama vetovoima on yhtä suuri kuin veden putoamiskiihtyvyydestä aiheutuva voima. Kapillaarinen nousukorkeus  $H$  (m) voidaan määrittää kaavalla (kaava 2.16) (Hagentoft 2001):

$$H = \frac{2 \cdot \sigma}{r \cdot \rho_w \cdot g} \cdot \cos(\theta), \quad (2.16)$$

jossa  $\sigma$  (N/m<sup>2</sup>) on veden pintajännitys,  $r$  (m) on veden pinnan muodostaman meniskuksen säde,  $\theta$  (°) on kontaktikulma veden ja putken välillä,  $\rho_w$  (1000 kg/m<sup>3</sup>) on veden tiheys ja  $g$  (9,81 m/s<sup>2</sup>) on putoamiskiihtyvyys.

Kapillaari-imua tapahtuu useimmilla rakennusmateriaaleilla, mikäli ne joutuvat kosketuksiin nestemäisen veden kanssa. Kapillaari-imua tapahtuu myös alle 100 % RH:ssa kapillaarikondenssin tuottaessa huokosverkostoon nestemäistä vettä. Perusrakenteet voivat joutua joskus vapaaseen vesikosketukseen maaperän valumavesien toimiessa vapaana vedenpintana. Yleisemmin vapaana vedenpintana on kuitenkin pohjaveden pinta.

## 2.4.5 Kosteuslähteet

Rakennusmateriaalit joutuvat elinkaarensa aikana moninaisten kosteustekijöiden rasittamaksi. Ne voidaan jakaa esimerkiksi rakennuksen ulkopuolisiin, sisäpuolisiin ja rakentamisaikaisiin kosteuslähteisiin. Erilaisia rakennukseen vaikuttavia kosteuslähteitä ovat esimerkiksi (Hagentoft 2001):

- Rakennuksen ulkopuoliset lähteet
  - Ulkoilman kosteus
  - Sade
  - Maaperän kosteus
- Rakennuksen sisäpuoliset lähteet
  - Sisäilman kosteus
  - Käyttövedet
  - Vuodot
- Rakentamisaikaiset lähteet
  - Rakennusaikainen kosteus

Ulkoilman suhteellinen kosteus Suomessa vaihtelee talvikuukausien ja kesäkuukausien välillä melko vähän, mutta vesihöyrypitoisuus ulkoilmassa vaihtelee paljon. Talvella suhteellinen kosteus on hieman korkeampi (85-90 % RH) kuin kesällä (65-80 % RH). Vesihöyrypitoisuus taas on ulkoilmassa kesällä korkeimmillaan (9...10,5 g/m<sup>3</sup>) ja alhaisimmillaan se on talvella (2...3 g/m<sup>3</sup>). (Björkholtz 1990)

Sade voi esiintyä nestemäisenä vetenä ja lumena. Tuulen vaikutuksesta sateen suunta voi olla mitä tahansa pystysuorasta vaakasuoraan. Vinossa kulmassa laskeutuvaa sadetta kutsutaan myös viistosateeksi. Sade kastelee valmiissa rakenteessa etenkin ulkoseinien yläosia. Sateelta voi parhaiten suojautua riittävän pitkällä räystäsrakenteella, joka voi estää parhaimmassa tapauksessa ulkoseinän kastumisen jopa kokonaan. (Björkholtz 1990, Hagentoft 2001)

Maaperässä kosteutta on eri muodoissa. Maaperän kosteudeksi voidaan luetella ainakin pintavesi, kapillaarivesi ja pohjavesi. Rakennuksissa maaperän kosteutta vastaan suojaututaan kapillaarisen nousun estävillä kapillaarikatkoilla sekä maanvaraisen lattian alla että sokkeleissa. (Leivo & Rantala 2000)

Sisäilman vesihöyrypitoisuus  $v_s$  (kg/m<sup>3</sup>) on sidoksissa ulkoilman vesihöyrypitoisuuteen. Sisäilman vesihöyrypitoisuus voidaan määrittellä kaavalla (kaava 2.17) (Leivo & Rantala 2002):

$$v_s = v_u + \frac{G}{n \cdot V}, \quad (2.17)$$

jossa  $v_u$  (kg/m<sup>3</sup>) on ulkoilman vesihöyrypitoisuus,  $G$  (kg/h) on kosteuden tuotto sisällä,  $n$  (1/h) ilman vaihtuvuus aikayksikössä ja  $V$  (m<sup>3</sup>) on tarkasteltavan tilan tilavuus. Kaavan 2.15 jälkimmäinen termi kuvaa sisäilman kosteuslisää ja sille on määritetty kirjallisuudessa erilaisia valmiita arvoja. Esimerkiksi asuinrakennuksissa kosteuslisän mitoitusarvo on talvella 5 g/m<sup>3</sup> (RIL-255-1-2014).

Putkivuotojen seurauksena rakenteisiin päässyt kosteusmäärä voi olla erittäin merkittävä, mutta sen suuruutta ei voi määrittellä yleisesti. Putkivuodon seurauksena rakenteeseen vuotanut vesimäärä riippuu vuodon suuruudesta, ja siitä kuinka pitkään vuoto on jatkunut.

Rakennusaikainen kosteus  $w_{rak}$  (kg/m<sup>3</sup>) tarkoittaa rakentamisvaiheessa rakennusmateriaaliin fysikaalisesti sitoutuneen kosteuspitoisuuden ja rakennuksen käytössä tasapainon saavuttaneen materiaalin kosteuspitoisuuden erotusta (kaava 2.18).

$$w_{rak} = w_0 - w_{kem} - w_{tasap}, \quad (2.18)$$

jossa  $w_0$  (kg/m<sup>3</sup>) on rakennusvaiheessa rakenteeseen sitoutunut kosteuspitoisuus,  $w_{kem}$  (kg/m<sup>3</sup>) on rakennusaineeseen kemiallisesti sitoutunut kosteuspitoisuus ja  $w_{tasap}$  (kg/m<sup>3</sup>) on rakenteen sisältämä kosteuspitoisuus sen saavutettua tasapainotilan ympäristönsä kanssa. (Björkholtz 1990, Hagentoft 2001)



Merkittävää rakennusaikaista kosteutta esiintyy erityisesti valettavilla ja muurattavilla rakenteilla, mutta myös puulla. Betonin lujuusluokan nostaminen yleisesti ottaen laskee rakennusaikaisen kosteuden määrää. Rakennuksen runkomateriaalien yleisiä rakennusaikaisia kosteuksia on esitetty taulukossa 2.3.

**Taulukko 2.3** Joidenkin runkomateriaalien rakennusaikaisia kosteuksia (Björkholtz 1990)

Materiaali	W <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	W <sub>kem</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	W <sub>tasap, 50 % RH</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	W <sub>rak</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
Paikalla valettu betoni				
C20/25	180	57	33	90
C32/40	180	70	40	70
Kevytbetoni	100-200	-	20	80-180
Kalkkisementtilaasti	300	20	30	250
Muurattu tiilirakenne	80	-	10	70
Puu	99,8	-	40	20-40

## 2.5 Rakenteen kuivuminen

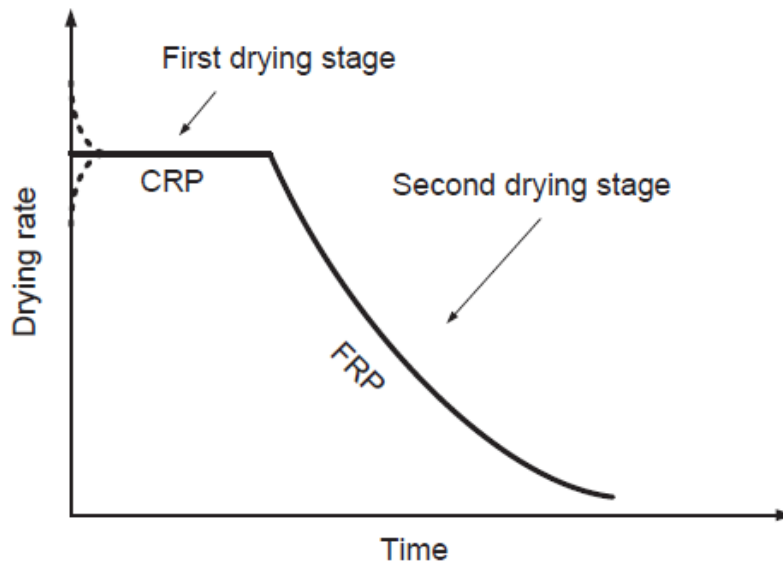
Kuivuminen tapahtuu rakenteen pinnalta. Pinnalta haihtuva ja diffusoituva kosteus laskee rakenteen pintaosan kosteuspitoisuutta. Se taas johtaa kosteuden virtaukseen rakenteen sisältä pintaan kosteuden pyrkiessä siirtymään pitoisuuserojen suhteen suuremmasta pitoisuudesta pienempään.

Rakenteesta poistuva kosteusvirran tiheys voidaan esittää kaavalla (kaava 2.19) (Hagendoft 2001):

$$g = 2 \cdot \frac{v - v_a}{Z_v(\varphi) + Z_{vs}}, \quad (2.19)$$

jossa  $v$  (kg/m<sup>3</sup>) on rakenteen keskikohdan vesihöyrypitoisuus,  $v_a$  (kg/m<sup>3</sup>) on rakenteen ulkopuolisen ilmatilan vesihöyrypitoisuus,  $Z_v(\varphi)$  (s/m) on rakenteen keskikohdan ja ulkopinnan välinen vesihöyrynvastus tietyssä suhteellisessa kosteudessa ja  $Z_{vs}$  (s/m) on rakenteen ulkopinnan vesihöyrynvastus. Kaavassa 2.19 ensimmäisenä oleva kerroin 2 tarkoittaa sitä, että kappale pystyy kuivumaan kahteen suuntaan. Mikäli kuivuminen on toiseen suuntaan estetty, käytetään kertoimen tilalla kerrointa 1.

Kuivumisnopeus kullakin hetkellä riippuu kuivumista eniten rajoittavasta tekijästä. Kuivumisessa on havaittavissa kaksi eri vaihetta (kuva 2.9): ensimmäinen kuivumisvaihe (tasainen kuivumisnopeus) ja toinen kuivumisvaihe (hidastuva kuivumisnopeus). Lisäksi katkoviivalla kuvassa 2.9 esitetty kuivumisnopeuden vaihtelu johtuu kappaleen alkulämpötilan suhteesta tasapainotilan lämpötilaan, mikä voi joko hidastaa tai nopeuttaa alkuvaiheen kuivumisnopeutta.



**Kuva 2.9** Rakenteen kuivumisnopeus (Van Belleghem et al. 2014)

Ensimmäisessä vaiheessa rakenteen pinnalta haihtuva kosteus on yleensä rakenteen kuivumista rajoittava tekijä, eli  $Z_{vs}$  on suurempi kuin  $Z_v(\varphi)$ . Tällöin rakenteen sisältä pintaan voi siirtyä enemmän kosteutta kuin rakenteen pinnalta pystyy haihtumaan, ja näin ollen rakenteen pinta pysyy kosteana. Ensimmäisessä vaiheessa rakenteen kuivumisnopeus on lähes vakio. (Vinha 2011)

Ensimmäisen vaiheen kuivuminen kestää niin kauan, kun rakenteen sisäosasta pinnalle siirtyvä kosteus on suurempi tai yhtäsuuri kuin pinnalta haihtuva kosteus. Toinen, ja usein ajallisesti merkittävin, kuivumisvaihe alkaa siitä, kun rakenteen sisältä pintaan siirtyvä kosteus ei enää ole yhtä suuri kuin pinnalta poistuva kosteus, eli  $Z_v(\varphi)$  on suurempi kuin  $Z_{vs}$ . Tällöin kuivumista rajoittavaksi tekijäksi muodostuu sisältä pintaan siirtyvän kosteuden määrä. Toisessa vaiheessa kuivumisnopeus hidastuu jatkuvasti, ja loppuu lopulta kokonaan rakenteen saavuttaessa tasapainokosteuden.

Rakenteen kuivumisen ensimmäisessä vaiheessa kapillaarinen rintama eli yhtenäinen kapillaariverkosto on koko rakenteen paksuinen. Kuivuminen hidastuu, kun kapillaarinen rintama siirtyy kohti rakenteen sisäosaa, jolloin rintaman ja rakenteen pinnan välillä kosteuden pitää siirtyä diffuusion ja pintadiffuusion avulla. Toisin sanoen rakenteen kuivussa  $Z_v(\varphi)$  muuttuu jatkuvasti. Kun diffuusiolla kuljettava matka kasvaa jatkuvasti, myös kuivumisnopeus hidastuu jatkuvasti. Vesimolekyylien siirtyminen diffuusiolla on hidasta verrattuna kapillaariseen siirtymiseen. (Hagentoft 2001)

Eri materiaaleilla kuivuminen tapahtuu eri tavalla. Esimerkiksi tiilellä kapillaarinen veden siirtyminen on nopeaa, jolloin materiaali kuivuu pääosin ensimmäisen vaiheen periaatteen mukaisesti. Toinen ääripää on betoni, jolla kuivuminen tapahtuu melkein kokonaan toisen kuivumisvaiheen mukaisesti. (Pentti & Hyypöläinen 1999)

Joillakin materiaaleilla, kuten esimerkiksi betonilla, myös kemiallinen sitoutuminen (hydrataatio) vaatii vettä. Tätä kuivumismuotoa kutsutaan sitoutumiskuivumiseksi. Tällöin materiaalissa tapahtuva sitoutuminen laskee materiaalin haihtumiskykyisen veden määrää ja näin rakennusaikainen kosteus rakenteessa vähenee. Kemiallisesti sitoutuneen veden määrä kokonaisvesimäärästä ei betonirakenteissa kuitenkaan ole yleensä kovin suuri (Mannonen 2006).

## **2.6 Ulkoseinärakenteiden kosteusteknisen toiminnan periaate**

Oikealla tavalla suunniteltu ja toteutettu ulkoseinärakenne suojaa sisätiloja ulkopuolisilta kosteuslähteiltä ja mahdollistaa samalla halutun sisäilmaston toteutumisen. Seinärakenteen tulee olla siis sellainen, että rakenteeseen ei tunkeudu tai kerry haitallisessa määrin kosteutta. Jos rakenteeseen voi tietyssä olosuhteessa kerääntyä kosteutta, on sen voitava kuivua. (Pentti & Hyypöläinen 1999)

Useasta eri materiaalikerroksesta koostuvat ulkoseinärakenteet suunnitellaan tavallisesti siten, että materiaalien vesihöyrynvastukset kasvavat kerroksissa ulkoa sisälle päin tultaessa. Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C2 (1999) mukaan ”avohuokoisen lämmöneristeen lämpimällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastuksen tulee olla vähintään viisinkertainen verrattuna kylmällä puolella olevan rakennekerroksen vesihöyrynvastukseen”. Useissa rakenteissa vesihöyrynvastussuhteen on oltava kuitenkin tätä suurempi, jotta rakenne on kosteustekniseltä toiminnaltaan turvallinen (RIL 107-2012).

Seinän kosteustekninen toiminta riippuu seinän käyttötarkoituksesta. Maanvastaiseen ei-nään vaikuttaa erilaiset rasitukset kuin ulkotilaan rajoittuvaan ulkoseinään. Kaikista haastavin tilanne on, jos seinään kohdistuvan kosteusrasituksen suunta vaihtelee. Tällöin rakenteen kuivumisen mahdollistaminen on erityisen tärkeää.

Mikäli seinärakenteen molemmille puolille asetetaan vesihöyryä huonosti läpäisevä kerros, on kerrosten väliin jäävän materiaalin kuivatus varmistettava erikseen. Tällaista molemmin puolin suljettua rakennetta ei suositella etenkään kuivumista vaativille materiaaleille. (RakMK C2 1999)

## 3. BETONI JA KOSTEUSMITTAUKSET

### 3.1 Betoni

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali. Vuosittainen betonin käyttö maailmassa on noin 5 miljardia tonnia ja Suomessa betonia käytetään noin 12 miljoonaa tonnia. Betonin käytöstä noin 60 % sijoittuu rakennuksiin ja 40 % infrastruktuuriin. Betonirakentamisen osuus Suomessa kaikista talonrakentamisen runkorakenteista on 40 % ja julkisivuista 15 %. (Betonikeskus 2007)

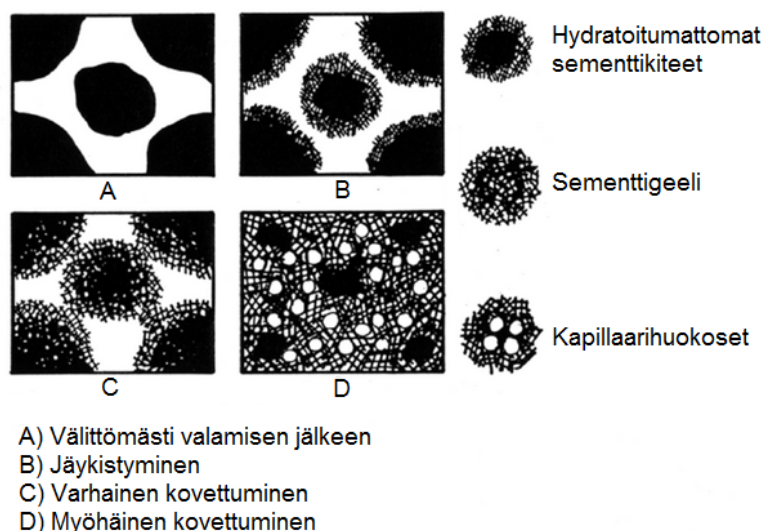
Betoni on synteettinen kivimateriaali. Se koostuu runkoaineesta (kiviaines), sideaineesta (sementti) ja vedestä. Lisäksi betoniin voidaan sekoittaa lisäaineita esimerkiksi työstedävyyden, pakkasenkestävyyden tai muiden haluttujen ominaisuuksien parantamiseksi (Mannonen 2005). Kiviaines on tavallisesti joko luonnon muokkaamaa tai konemurskattua kiveä. Kiviaineksen raekoko vaihtelee betonin käyttökohteen vaatimusten mukaisesti. Suomessa tavallisin sementtilaatu portlandsementti koostuu jauhetusta portlandklinkkeristä ja kaliumsulfaatista. Portlandklinkkeri koostuu alitista, beliitistä, aluminaatista ja ferriitistä, joita kutsutaan myös klinkkerin eri faaseiksi. Kaliumsulfaatin lisääminen sementtiin vaikuttaa sitoutumiseen, ja näin ollen sen määrää säätämällä voidaan säätää sementin sitoutumisaikaa. (Virola & Raivio 2000)

Veden ja sementin reagointia keskenään kutsutaan hydrataatioksi (kuva 3.1). Hydrataatioreaktio johtaa betonimassan kemiallisiin ja fysikaalisiin muutoksiin, eritoten ainesosien keskinäiseen sitoutumiseen ja betonimassan kovettumiseen. Sementin hydrataatio on monimutkainen kemiallinen reaktiosarja, jossa sementin eri faasit reagoivat sekä veden kanssa että keskenään. Hydrataatio tapahtuu sementtilaadusta riippuen pääosin ensimmäisten kuukausien aikana. Se voi kuitenkin jatkua hitaasti jopa vuosia betonin valamisen jälkeen, mikäli hydrataation vaatimaa vettä on vielä käytettävissä. (Virola & Raivio 2000)

Teoreettisesti sementin täydelliseen hydratoitumiseen vaadittu vesimäärä on noin 25 % sementin painosta. Hydrataatiossa muodostuviin geelihuokosiin sitoutuu kuitenkin fysikaalisesti vettä tämän lisäksi noin 15 % sementin painosta. Täydellisen hydratoitumisen vaatima vesimäärä on näin ollen välillä 35-45% sementin painosta. Käytännössä hydrataatio ei tapahdu kokonaan, ja hydrataatioaste jää usein välille 0,7...0,8. (Virola & Raivio 2000, Ljungkrantz et al. 1994)

Betoni on pienihuokoinen materiaali, ja pystyy siksi sitomaan voimakkaasti kosteutta. Betonin huokostilavuus koostuu geelihuukosista, kapillaarihuukosista ja suojahuukosista. Geelihuukokset ovat halkaisijaltaan vain 4-5 vesimolekyylin suuruisia. Kapillaarihuukokset

ovat halkaisijaltaan alle 1  $\mu\text{m}$ , ja täyttyvät vedellä kapillaarikondenssin (kappale 2.2) ansiosta. Suojahuokokset saadaan aikaan lisäaineilla ja ovat betonin pakkasenkestävyyttä parantavia huokosia. (Ljungkrantz et al. 1994)



**Kuva 3.1** Sementin hydrataatioreaktio, kuva muokattu lähteestä (Ljungkrantz et al. 1994)

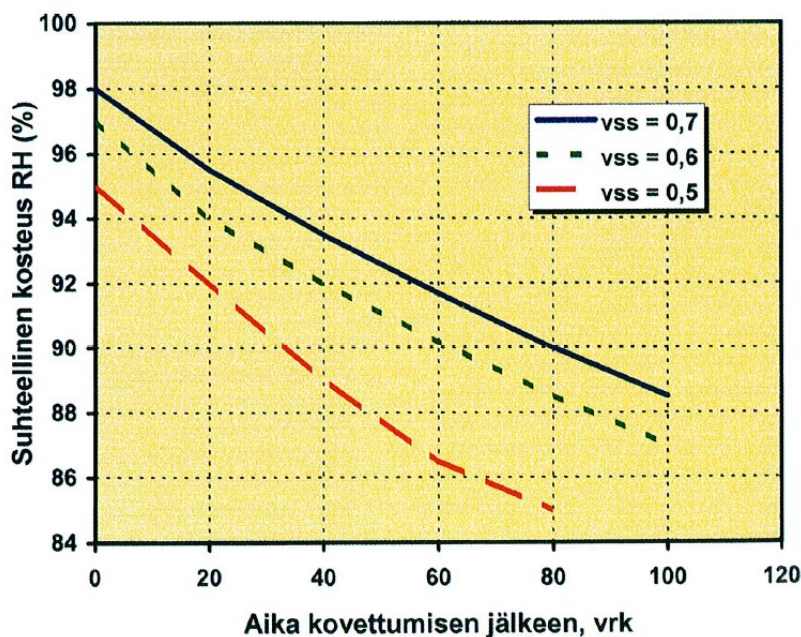
Tuore betoni on voimakkaasti alkalinen (pH noin 13...14) materiaali. Alkalisuus parantaa betonin mikrobiologista kestävyyttä ja suojaa teräsbetonin raudotteita korroosiolta. Etenkin ulkoilmaan rajatuilla betonirakenteilla betonin alkalisuus vähenee karbonatisoitumisen vuoksi ajan kuluessa, ja se luo sekä korroosion muodostumiselle että mikrobikasvulle paremmat olosuhteet. (Pitkäranta 2016)

Betonia voidaan tehdä tarpeen mukaan eri lujuuksisina. Betonin lujuus ilmaistaan merkinnällä K30 (kuutiopuristuslujuus) tai C25/30 (lieriöpuristuslujuus). Molemmat em. merkinnät tarkoittavat betonin puristuslujuuden olevan 30 MPa, kun puristusmittaus tehdään käyttämällä 150 mm särmäistä kuutiokappaletta. Betonin lujuus vaihtelee tavallisesti betoniteollisuuden käyttökohteissa välillä C25/30...C50/60. Betonin lujuus riippuu monesta asiasta, erityisesti käytetystä vesi-sementti-hiekka-suhteutuksesta. Yleinen periaate on, että suuri vesisementtisuhde alentaa betonin puristuslujuutta. (Mannonen 2005)

### 3.2 Betonirakenteen kuivumiseen vaikuttavat tekijät

Betonilaatu ja erityisesti betonissa käytetty vesisementtisuhde (v/s-suhde) vaikuttaa betonin alkuvaiheen kuivumiseen ja lujittuneen betonin kosteudensiirto-ominaisuuksiin (kuva 3.2). Mitä suurempi on massassa käytetty v/s-suhde, sitä enemmän betonissa on ylimääräistä haihtumiskykyistä vettä. Normaalisissa lattiabetonissa vesi-sementtisuhde on välillä 0,6...0,8. Tällöin betonikuution valmistamiseen käytetään vettä 180...200 l. Tästä vesimäärästä sitoutumiseen kuluu vettä 50...70 l. Näin ollen haihtumiskykyistä vettä jää

betoniin vielä yli  $100 \text{ l/m}^3$ . Hydrataatioreaktion tapahtumisen jälkeen betonin suhteellinen kosteus on yleensä 90...98 % RH, riippuen käytetystä betonilaadusta. (Mannonen 2006, Merikallio 2002)



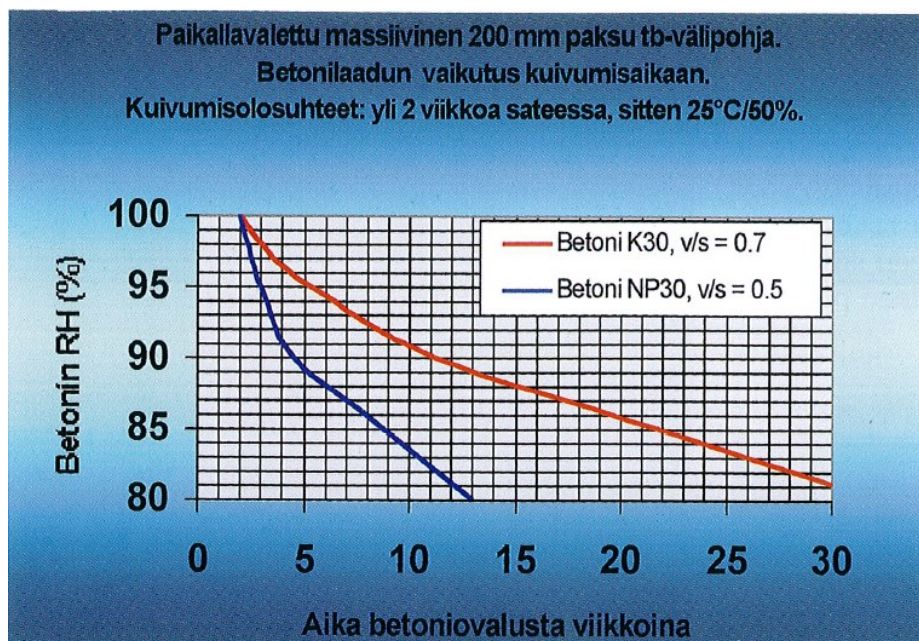
**Kuva 3.2** Erilaisten betonien kuivumisaikojä jälkihoidon päättymisen jälkeen (Lumme & Merikallio 1997)

Betonin lujuusluokan nostaminen ei suoraan nosta betonin kuivumisnopeutta. Korkean lujuusluokan betoneissa on kuitenkin yleensä suhteellisen pieni vesisementtisuhde, jolloin ylimääräistä vettä on verrattain vähän. Pienen vesimäärän ansiosta myös alhainen suhteellinen kosteus voidaan saavuttaa nopeammin kuin korkeamman v/s-suhteen betoneilla.

Rakenneratkaisulla voidaan merkittävästi vaikuttaa betonirakenteen kuivumiseen. Rakenneratkaisun vaikutus perustuu kuivavan betonirakenteen ympärille muodostettavien kuivumista ajavien potentiaalien hallintaan. Esimerkiksi kosteussulku tai huonosti kosteutta läpäisevä materiaali betonin pinnassa voi estää betonin kuivumisen pinnoitettuun suuntaan kokonaan. Tällöin poistuvan kosteuden täytyy kulkea pitempi matka päästäkseen haihtumiskykyiseen pintaan. Rakenteen kuivuessa vain yhteen suuntaan, on kuivumisnopeus kaksinkertaista rakennevahvuutta vastaava (kappale 2.5). Yhteen suuntaan kuivuvia betonirakenteita ovat esimerkiksi teräsluottolaattarakenteet ja tiivistä lämmöneristettä vasten valettu betoni. Kahteen suuntaan kuivuva rakenne on tavallisesti esimerkiksi välipohja tai väliseinä. (Merikallio 2002)

Haluttaessa käyttää tavallista nopeammin kuivuvaa betonia, käytetään nopeammin päällystettäviä NP-betoneita. NP-betoni saadaan aikaan alentamalla vesi-sementtisuhdetta, toisin sanoen sementtimäärää lisäämällä ja betonin huokostuksella. NP-betonin kuivumista verrattuna tavalliseen betoniin on esitetty kuvassa 3.3.





**Kuva 3.3** NP-betonin kuivumisaikoja 300mm paksussa välipohjassa kesäolosuhteissa (Merikallio 2002)

Betonirakenteen ja sen ympäristön välisellä kosteuspitoisuuserolla on suuri vaikutus kuivumisnopeuteen. Pinnassa tapahtuva kosteudensiirtyminen tapahtuu suuremmasta kosteudesta pienempään. Kuivumisnopeus on riippuvainen kosteuspitoisuuseron suuruudesta. Mitä suurempi ero on betonin ja ympäristön välillä, sitä suurempi on kosteuden siirtymisnopeus. Koska ilman suhteellinen kosteus on lämpötilariippuvainen (kappale 2.1), voidaan ilman suhteellista kosteutta alentaa lämpötilaa nostamalla. Erityisesti talvella ulkoilman absoluuttisen kosteuden ollessa matala, saadaan sisätilaa lämmittämällä suhteellinen kosteus hyvin matalalle tasolle. Vastaavasti myös kesällä on järkevää lämmittää sisätila ulkoilmaa lämpimämmäksi, jotta suhteellinen kosteus ei nousisi ulkoilman suhteellista kosteutta korkeammalle tasolle. Kuivumisen edistämiseksi olosuhteita voidaan parantaa lisäksi kuivaimilla ja ilmanvaihtoa lisäämällä. (Lumme & Merikallio 1997)

Betonirakenteen kastuminen vaikuttaa erittäin voimakkaasti kuivumiseen. Betonilla on kyky luovuttaa ja vastaanottaa kosteutta ympäristöstään. Tämän lisäksi betonilla on kyky imeä nestemäistä vettä kapillaarisesti (Björkholtz 1990). Betonin kyky imeä vettä on sitä suurempi, mitä korkeampi vesi-sementtisuhde betonissa on ja mitä myöhemmässä vaiheessa kastuminen tapahtuu (Merikallio 2002). Koska vesi siirtyy kapillaarisesti nopeasti betoniin, mutta diffuusiolla hitaasti betonista pois, voi betonirakenteen rakennusvaiheessa tapahtuneella kastumisella olla pitkäaikaiset seuraukset. Esimerkiksi ensimmäisen kahden viikon lisäkastumisen on havaittu tietyissä olosuhteissa aiheuttavan jopa 20 viikon pitenemisen kuivumisaikaan (Mannonen 2006).

Betonin liian nopea kuivuminen etenkin varhaisessa vaiheessa voi aiheuttaa betonissa halkeilua. Raudoituksen lisäksi halkeilua voidaan ehkäistä betonille tehtävällä jälkihoi-

dolla. Jälkihoito voidaan tehdä kastelemalla, suojaamalla betoni tai erillisellä jälkihoito-aineella. Kuivumisnopeuden parantamiseksi jälkihoito on syytä tehdä jollain muulla tavalla kuin kastelemalla. (Lumme & Merikallio 1997)

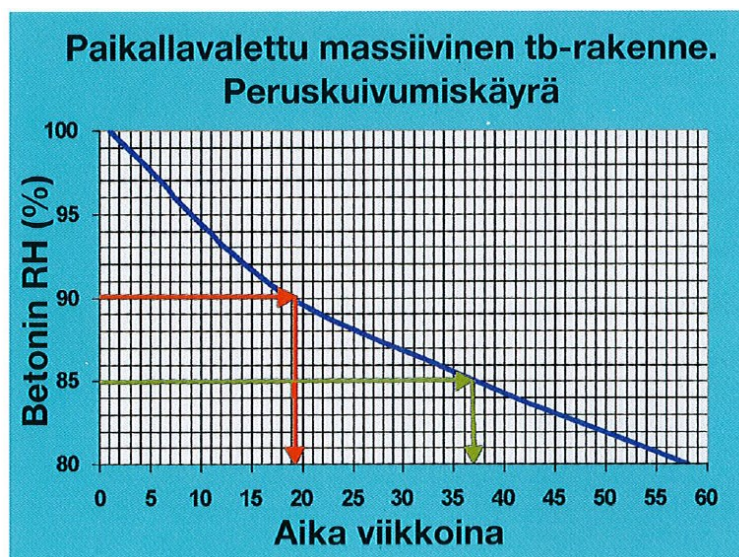
Betonin kosteudensiirto-ominaisuudet muuttuvat hydrataatioreaktion vaikutuksesta. Hydrataation edetessä betonin kapillaarihuokosten tilavuus pienenee ja betonista tulee tiiviimpää. Tästä syystä myös kosteuden liikkuminen huokosissa hidastuu. Näin ollen betonin kuivumisen nopeuttamiseksi on syytä mahdollistaa kuivuminen jo ennen hydrataation loppumista. (Lumme & Merikallio 1997)

Betonirakenteen kuivumisen arvioimiseen on kirjallisuudessa esitetty erilaisia ohjeita. Kuivumisaika-arviointikaavat perustuvat kokemusperäisiin havaintoihin. Koska kuivumiseen vaikuttavia tekijöitä on paljon, on kaavoissa otettu huomioon eri tekijöiden vaikutus kokonaiskuivumiseen. Kuivumisen arviointia voidaan tehdä kuitenkin lähinnä työsuunnittelua varten. Todellinen kosteus määrä rakenteessa on määritettävä kosteusmittauksin. (Merikallio 2002)

Betonin kuivumiseen kuluva aika  $t$  (vko) voidaan arvioida esimerkiksi kaavalla 3.1 (Merikallio 2002):

$$t = t_1 * a_1 * a_2 * a_3 \dots a_n \quad (3.1)$$

jossa  $t_1$  (vko) on peruskuivumiskäyrältä (kuva 3.4) luettava peruskuivumiseen kuluva aika ja  $a_1 \dots a_n$  (-) ovat eri osatekijöiden vaikutuskertoimet peruskuivumiseen. Eri vaikutuskertoimien lukuarvoja on koottu taulukkoon 3.1.



**Kuva 3.4** Peruskuivumiskäyrä betonirakenteen kuivumisen arviointiin (Merikallio 2002)



**Taulukko 3.1** Betonin kuivumisen arviointiin liittyviä vaikutuskertoimia, perustuu lähteeseen (Merikallio 2002).

Rakenteen paksuus (mm)	Vesisideainesuhde (v/s)			
	0,7	0,6	0,5	0,4
	Kerroin			
200	0,7	0,7	0,7	0,8
230	0,9	0,9	0,9	0,9
250	1,0	1,0	1,0	1,0
280	1,3	1,1	1,1	1,1
300	1,6	1,4	1,3	1,2

Kuivumissuunta	Vesisideainesuhde (v/s)			
	0,7	0,6	0,5	0,4
	Kerroin			
Kahteen suuntaan	1,0	1,0	1,0	1,0
Yhteen suuntaan	3,2	2,6	2,3	2,0

RH (%)	Lämpötila (° C)			
	10	18	25	30
	Kerroin			
35	1,2	0,8	0,7	0,6
50	1,2	0,9	0,7	0,6
60	1,3	1,0	0,8	0,7
70	1,4	1,1	0,8	0,7
80	1,7	1,2	1,0	0,9

Kastuminen	Vesisideainesuhde (v/s)			
	0,7	0,6	0,5	0,4
	Kerroin			
Kuivassa	0,8	0,9	0,9	1,0
Kosteassa yli 2 viikkoa	1,0	1,0	1,0	1,0
Kastunut yli 2 viikkoa	1,5	1,3	1,2	1,1

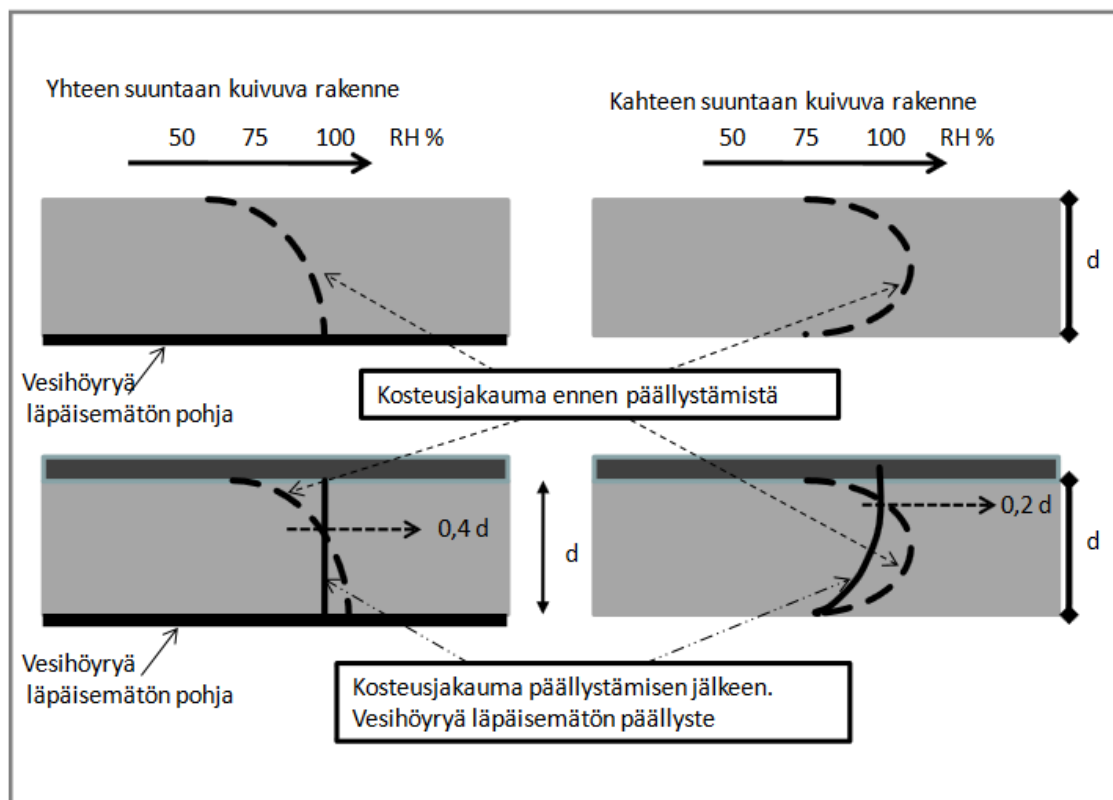
### 3.3 Betonirakenteen pinnoittaminen ja kosteusvauriot

Betonirakenteen kuivuminen hygroskooppiseen tasapainokosteuteen kestää usein kuu-kausia ja jopa vuosia. Betonirakenteen ei kuitenkaan tarvitse kuivaa hygroskooppiseen tasapainokosteuteen, jotta se voidaan turvallisesti pinnoittaa. Useimmiten rakennustyömaalla ei ole taloudellisesti mahdollistakaan odottaa kuivumisen tapahtumista kokonaan.

Rakenteen pinnoittaminen tai päällystäminen vesihöyryä huonosti läpäisevällä kerroksella aiheuttaa usein rakenteen kosteusprofiilissa muutoksia (kuva 3.5). Muutokset voivat olla hyväksyttäviä, tai niistä voi koitua ongelmia. Betonirakenteen päällystäminen voidaan suorittaa siinä vaiheessa, kun rakenne on kuivunut riittävästi, eikä rakenteeseen enää pääse muodostumaan ulkopuolista lisäkosteutta. Riittävään kuivumiseen kuluva aika

voidaan arvioida laskennallisesti. Koska kuivuminen on riippuvainen monesta eri tekijästä, on päällystämisen ajankohta varmistettava kosteusmittauksin, jottei rakenteeseen koidu vaurioita.

Betoni itsessään on hyvin kosteutta kestävä materiaali. Betonissa kosteus aiheuttaa vaurioita epäsuorasti raudotteiden korroosion ja pakkasrapautumisen kautta. Lisäksi betonipintaan kertyy ajan kuluessa likaa ja orgaanista ainetta, jota mikrobien on mahdollista käyttää ravintona, kun olosuhteet ovat muuten otolliset. (Pitkäranta 2016)



**Kuva 3.5** Periaatekuva betonirakenteen kosteusjakaumista ennen tiiviin pinnoitteen asentamista ja sen jälkeen (Merikallio 2009)

Betonirakenteiden kosteusvaurioista puhuttaessa kyse on usein enemmänkin betonin päällysteiden tai pinnoitteiden vaurioitumisesta. Kosteusvauriot voidaan jakaa karkeasti kolmeen luokkaan: esteettisiin, toiminnallisiin ja terveydelle haitallisiin vaurioihin. Vaurio voi sisältää ominaisuuksia useammasta kuin yhdestä luokasta. (Nevander & Elmarsson 1994)

- Esteettiset vauriot:
  - värjäytyminen
  - pintamateriaalien kupruilu
- Toiminnalliset vauriot:
  - kosteuden vaikutus energiatehokkuuteen → kosteat materiaalit päästävät läpi enemmän lämpöä.

- muodonmuutokset, etenkin puupohjaisilla materiaaleilla
- hajuhaitat
- liimauksien ja tartuntojen pettäminen alustasta
- Terveydelle haitalliset vauriot:
  - home- ja muut mikrobikasvustot
  - myrkkypäästöt

Päällystämisen vaatima kriittinen suhteellinen kosteus määritetään arviointisyvyydellä  $A$  (mm). Arviointisyvyys perustuu oletukseen, että betonin suhteellinen kosteus rakenteen pinnassa nousee pinnoittamisen jälkeen enintään arviointisyvyydessä olevan suhteellisen kosteuden arvoon (kuva 3.5). Arviointisyvyys riippuu käytetystä rakenteesta. Kahteen suuntaan kuivuvassa rakenteessa arviointisyvyys on 20 % rakenteen paksuudesta ( $0,2 * d$ ) ja yhteen suuntaan kuivuvassa rakenteessa 40 % rakenteen paksuudesta ( $0,4 * d$ ). Arviointisyvyyden  $A$  maksimiarvo on 70 mm. (Merikallio 2009)

Erilaisille pintamateriaaleille on esitetty erilaisia alusbetonin kriittisiä suhteellisia kosteuksia  $\varphi_{crit}$ , eli suhteellinen kosteus arviointisyvyydellä  $A$  tulisi olla enintään taulukon 3.2 mukainen. Betonin pinnassa ( $0,4 * A$ ) tulee suhteellisen kosteuden lukeman olla jokaisessa tapauksessa enintään 75 % RH. Taulukon arvot on koottu lattiapäällysteille, mutta niiden periaate lienee yhtäläinen seinärakenteiden kanssa.

**Taulukko 3.2** Alustabetonin suhteellisen kosteuden enimmäisarvoja arviontisyvyydellä erilaisia päällysteitä käytettäessä (Merikallio 2009)

**Alustabetonin suhteellisen kosteuden enimmäisarvot päällystyshetkellä**

Päällystemateriaali	Sisä- RYL 2000	by45/BLY7 Betoni- lattiat 2002	by 47 Betoni- rakentamisen laatuohjeet 2007 <sup>1)</sup>	Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet (2007) <sup>1)</sup>
Alustaan liimattava lautaparketti (ilman puun ja betonin välistä kosteudeneristystä)	60 %	85 %	-	85 % (normaalibetoni) 90 % (v/s < 0,5)
Mosaiikkiparketti	80 %	80 % (pinta < 75 %)	85 % 90 % (v/s < 0,5)	85 % 90 % (v/s < 0,5)
Kelluva lautaparketti (puun ja betonin välissä kosteudeneristys)	80 %	90 %	85 % 90 % (kost. kestävä tasoite tai ei tasoitetta)	85 %
Laminaatti (puun ja betonin välissä kosteudeneristys)	80 %	-	85 %	85 %
Huopa ja solumuovipoh-jaiset muovimatot	85 %	85 %	85 %	85 %
Muovimatot ilman huopa- tai solumuovipohjaa	90 %	90 %	85 %	85 %
Kumimatot	85 %	85 %	85 %	85 %
Linoleumi	90 %	90 %	85 %	85 %
Tekstiilimatot, joissa alusrakenne	85 %	85 %	85 %	85 %
Täyssynteettiset tekstiilimatot ilman alusrakennetta	90 %	90 %	90 %	90 %
Muovilaatat	90 %	90 %	90 %	90 %

<sup>1)</sup> kaikkien materiaalien kohdalla edellytetään lisäksi että betonin suhteellinen kosteus rakenteen pintaosissa 1-3 cm syvyydellä on alle 75 %

Eri pinnoitustuote- tai päällystevalmistajilla on usein myös omat tuotekohtaiset raja-arvot ja käytettävät mittausmenetelmät, joilla pinnoitusajankohta voidaan määrittää. Tällöin on syytä käyttää tuotevalmistajan ohjeita parhaan lopputuloksen saamiseksi.

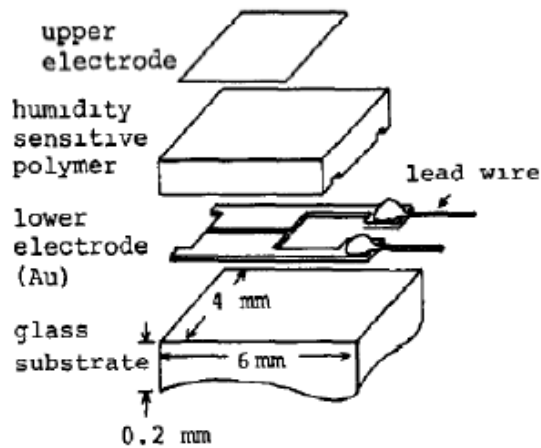
### 3.4 Kosteusmittaukset ja mittausmenetelmät

Kosteusmittauksia tehdään rakenteille yleensä määritettäessä rakenteen kosteuden lähtötasoa, kosteuden kehityksen seurannassa, määritettäessä rakenteen soveltuvuutta pinnoittamiseen ja kosteusvauriota epäiltäessä (Merikallio 2002, Björkholtz 1987). Rakenteen kosteusmittauksiin on olemassa useita menetelmiä, jotka jakaantuvat suuntaa antaviin ja tarkkoihin menetelmiin. Tarkat menetelmät ovat usein rakennetta rikkovia, ja siksi niiden käytölle on omat rajoituksensa. Aina ei kuitenkaan ole mahdollista tai välttämätöntä käyttää tarkkoja menetelmiä, jolloin voidaan käyttää suuntaa antavia menetelmiä. Useat mittausmenetelmät perustuvat käytännössä siihen, että kosteuspitoisuuden muuttuessa jokin toinen kalibroitu ja helposti mitattava suure (tilavuus, pituus, sähköiset ominaisuudet) muuttuu. (Pitkäranta 2016)

#### 3.4.1 Ilman suhteellinen kosteus

Ilman suhteellista kosteutta mittaavat kosteusanturit jaetaan toimintaperiaatteensa perusteella kolmeen ryhmään, kapasitiivisiin antureihin, sähköjohtavuuteen perustuviin (resistiivisiin) antureihin ja kastepisteantureihin. Betonirakenteiden tutkimiseen käytetään Suomessa eniten kapasitiivisia kosteusantureita. Vaikka tässä kappaleessa puhutaan ilman suhteellisen kosteuden mittaamisesta, voidaan ilmatilan kosteusantureita käyttää myös rakenteissa. Rakenteiden kosteusmittauksissa mitataan rakenteen ilmatilaan vapautuvan kosteuden määrää eli toisin sanoen rakenteen huokosilman suhteellista kosteutta. (Merikallio 2002)

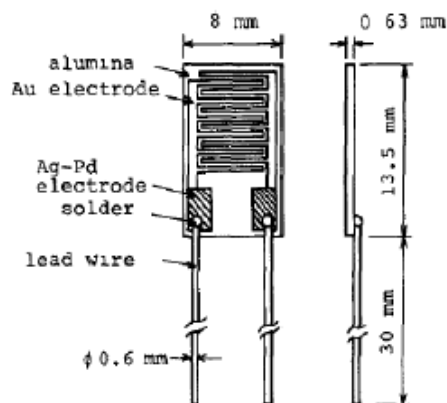
**Kapasitiiviset** anturit mittaavat nimensä mukaisesti kapasitanssia. Kapasitiivinen kosteusanturi (kuva 3.6) koostuu kahdesta elektrodilevystä ja niiden välissä olevasta kosteudelle herkältä muovi- tai polymeerikalvosta. Ilman suhteellisen kosteuden muuttuessa kalvo reagoi muutokseen ja samalla kalvon permittiivisyys eli dielektrisyysvakio muuttuu. Permittiivisyyden muutos johtaa kapasitanssin muutokseen. Tietty kapasitanssi on valmistajan referenssiaineiston perusteella säädetty vastaamaan tiettyä ilman suhteellista kosteutta tietyssä lämpötilassa, ja näin ollen mitattu kapasitanssi voidaan ilmoittaa ilman suhteellisen kosteuden lukemana. (Merikallio 2002)



**Kuva 3.6** Esimerkki kapasitiivisesta kosteusanturista (Farahani et al. 2014)

Muovi- tai polymeerikalvon permittiivisyyteen voi vaikuttaa myös muut ympäristön pienhiukkaset, jolloin anturi näyttää todellisuudesta poikkeavaa lukemaa. Pienhiukkasten määrä ei usein tavallisessa huoneilmassa ole suuri suhteessa anturin pienhiukkaskapasiteettiin. Anturin joutuessa vaativiin olosuhteisiin se voi kuitenkin kontaminoitua. Tällöin anturi on kalibroitava uudelleen. Joillakin kapasitiivisilla kosteusantureilla on myös havaittu hystereesiä (Farahani et al. 2014). Tästä syystä jatkuvissa mittauksissa käytössä olevien anturien kalibrointi on suoritettava samassa järjestyksessä kuin kosteuspitoisuuden oletetaan mitattavassa kohteessa muuttuvan.

**Resistiiviset** anturit (kuva 3.7) mittaava huokaisen väliaineen kosteuspitoisuutta systeemin sähkövastuksen eli resistanssin avulla. Mittaus perustuu huokaisen materiaalin sähkövastuksen muutokseen suhteellisen kosteuden muuttuessa. Huokoinen materiaali voi olla esimerkiksi puuta, jolle on referenssiaineiston perusteella määritetty tietty sähkövastuksen arvo vastaamaan tiettyä suhteellisen kosteuden arvoa.



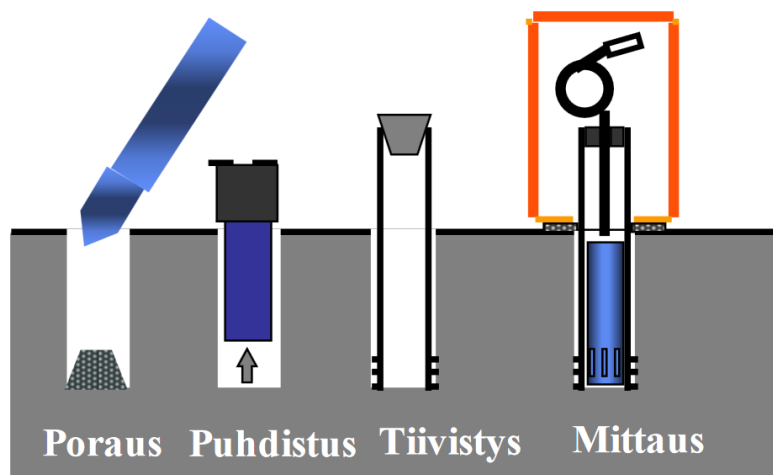
**Kuva 3.7** Esimerkki resistiivisestä kosteusanturista (Farahani et al. 2014)

### 3.4.2 Porareikämittaus rakenteesta

Porareikämittaus on tällä hetkellä Suomessa yleinen tapa määrittää betonin huokosilman suhteellinen kosteus. Porareikämittaus soveltuu betonirakenteen suhteellisen kosteuden tarkkaan mittaukseen + 15 °C...+ 25 °C lämpötilassa. Suositeltavin lämpötila porareikämittaukselle on + 20 °C, koska se on usein mittalaitteiden kalibroinnissa käytetty lämpötila. (Rakennustieto 2010)

Porareikämittauksessa rakenteeseen porataan haluttuun tarkastelusyvytyteen ulottuva reikä. Reikä tehdään kuivamenetelmällä, jotta rakenteeseen ei pääse porauksessa lisäkosketusta. Poraamisen jälkeen reikä puhdistetaan imuroimalla reikä sopivalla imupäällä, tiivistetään ja jätetään tasoittumaan (kuva 3.8). Poraaminen vaikuttaa tarkasteltavan materiaalin lämpötila- ja kosteusjakaumaan reiän ympärillä, minkä takia reiän on annettava tasoittua riittävän pitkään poraamisen jälkeen. Riittävän pitkäksi tasoittumisajaksi on esitetty betonirakenteelle vähintään 3 vuorokautta (Merikallio 2002).

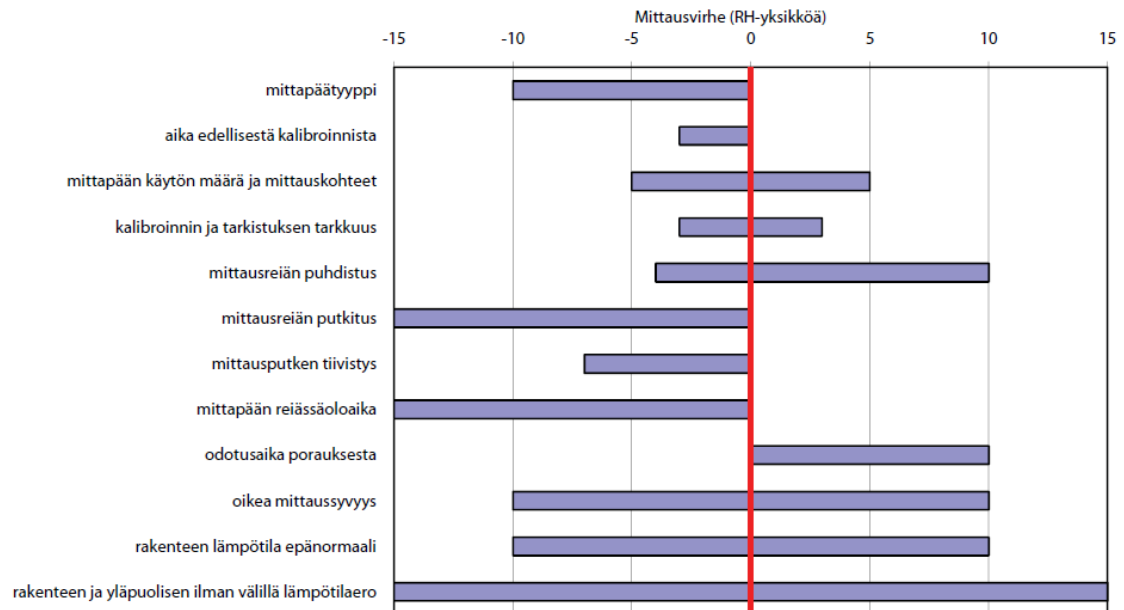
Tasoittumisajan jälkeen mitta-anturi voidaan asentaa reikään. Mitta-anturin on jälleen annettava tasoittua reiässä vallitsevaan kosteuteen. Vaadittava tasoittumisaika vaihtelee riippuen monesta eri tekijästä, joita ovat esimerkiksi betonilaatu, betonin kosteus ja mitta-anturin kosteuskapasiteetti. Yleensä vaadittu tasoittuminen saavutetaan porareikämittauksessa 1-24 tunnissa. Mikäli käytössä on tiedonkeruulaite, joka tallentaa mittaustulokset automaattisesti, voidaan mitta-anturin tasoittumista seurata jatkuvasti. Tasaantumisen katsotaan tapahtuneeksi siinä vaiheessa, kun anturin ilmoittama lukema ei enää merkittävästi muutu ajan kuluessa. (Merikallio 2002)



**Kuva 3.8** Porareikämittauksen työvaiheet (Merikallio 2009)

Porareikämittausta pidetään luotettavana mittaustapana. Sen mittausten menetelmään ja suorittamiseen liittyy kuitenkin useita mittaustuloksen kannalta merkittäviä epävarmuustekijöitä (kuva 3.9). Yhdenkin epävarmuustekijän vaikuttaessa mittavirhe voi olla jopa suuruusluokkaa  $\pm 15$  % RH. Näin ollen yleisesti tavanomaisesti hyvänä pidetty

mittaustarkkuus  $\pm 5\%$  RH voidaan saavuttaa, kun mittauksessa noudatetaan erityistä huolellisuutta.



**Kuva 3.9** Porareikämittauksen epävarmuustekijöitä, kun betonin pinta on kuivempi kuin sisäosat. (Rakennustieto 2010)

### 3.4.3 Näytepalamittaus rakenteesta

Näytepalamittausmenetelmä soveltuu betonirakenteen mittaukseen lähes aina. Poikkeuksen tekee hyvin syvältä betonirakenteesta koepalan ottaminen, jossa itse työn suorittaminen on hankalaa. Koepalamenetelmän hyötynä on nopeus, mittaustarkkuus ja soveltuminen jopa  $-20\ldots+80\text{ °C}$  lämpötiloihin. (Rakennustieto 2010)

Näytepalamenetelmässä betonirakenteen pintaan piikataan halutulle syvyydelle (5 mm tarkastelussyvyyden yläpuolelle) ulottuva kolo. Kolon pohjalta irrotetaan betonipaloja siten, että niiden alareuna on mitatulta syvyydeltä (kuva 3.10). Välittömästi palojen irroittamisen jälkeen ne laitetaan kosteusanturin kanssa koeputkeen, joka tiivistetään. Koeputki asetetaan tasoittumaan  $+20\text{ °C}$  lämpötilaan, ja kosteuslukema luetaan tasoittumisen tapahduttua. (Lumme & Merikallio 1997)





taperiaate perustuu materiaalin sähköisten ominaisuuksien (sähkönjohtavuus, permittiivisyys, kapasitanssi) muutoksiin materiaalin kosteuspitoisuuden muuttuessa. Eri materiaalien sähköisille ominaisuuksille on pintakosteudenosoittimissa valmiiksi kalibroituja lukemia eri kosteuspitoisuuksissa, ja näin ollen lukema voidaan muuttaa materiaalin kosteuspitoisuudeksi. (Merikallio 2002)

Betonin kosteusmittauksiin pintakosteudenosoittimet sopivat vain suuntaa antavasti, koska betonilaaduissa on paljon vaihtelua. Betonin suuren sementtimäärän (alhaisen v/s-suhteen betonit) ja lisäaineiden on huomattu lisäävään sähkönjohtavuutta, jolloin pintakosteudenosoitin voi antaa suuria arvoja. Lisäksi betonirakenteessa olevat lähellä pintaa olevat raudoitteet tai vesi- ja sähköjohdot lisäävät paikallisesti sähkönjohtavuutta. Tästä syystä pintakosteudenosoitin voi näyttää suuriakin kosteuspitoisuuslukemia, vaikka kosteuspitoisuus todellisuudessa olisikin pieni. (Merikallio 2002)

Pelkästään pintakosteudenosoittimen lukemien perusteella ei tule tehdä päätöstä korjaustarpeesta (Merikallio et al. 2007). Pintakosteudenosoittimet soveltuvat parhaiten sellaisiin tilanteisiin, joissa betonipinnasta selvitetään muusta vastaavasta rakenteesta poikkeavia kosteuspitoisuuksia. Tällainen tilanne on esimerkiksi vesivahingon alan laajuuden määrittäminen ja tarkempien kosteusmittauskohtien kartoittaminen. Kartoittamisessa voidaan verrata kostuneen alueen pintakosteudenosoittimen osoittamaa lukemaa oletetun kuivan alueen lukemaan. (Merikallio 2002)

### **3.4.5 Valuun upotettavat anturit**

Valettaviin materiaaleihin, kuten esimerkiksi betonirakenteeseen, voidaan sijoittaa kosteusantureita jo valuvaiheessa käyttämällä kyseiseen tarkoitukseen tarkoitettuja antureita. Tällaisten anturien voidaan antaa olla tutkittavassa materiaalissa vuosien ajan, ja tarkastella kosteusteknistä toimivuutta vielä rakennuksen käytön aikana. Valuantureita on olemassa sekä kapasitiivisia että resistiivisiä. (Lumme & Merikallio 1997)

Suomessakin markkinoille on tullut valuun sijoitettavia kosteusantureita. Betoniin sijoitettavat valuanturit joutuvat erittäin vaativiin alkali- ja kosteusrasituksiin. Valuanturien heikkoudeksi voidaan lukea anturin kertakäyttöisyys ja se, että niiden pitkäaikaiskestävyyden varmistaminen on käytännössä erittäin hankalaa. (Lumme & Merikallio 1997)

### **3.4.6 Punnitus-kuivaus-menetelmä**

Punnitus-kuivaus-menetelmässä mitataan koekappaleen painoa ja verrataan sitä kappaleen kuivapainoon. Punnitus suoritetaan punnitsemalla kappale tai näytepala rakenteesta. Yleensä käytetään punnitus-kuivaus menetelmää betonin sisältämän vesimäärän määrittämiseen. Punnitus suoritetaan ennen ja jälkeen kuivauksen. Näin saadaan selville kuivauksessa poistunut kosteusmäärä. Kuivaus suoritetaan yleensä + 105 °C lämpötilassa, jolloin vain kappaleeseen fysikaalisesti sitoutunut vesi poistuu.

Punnitus-kuivaus-menetelmä kertoo tarkasti näytepalassa olleen kosteusmäärän. Kuitenkaan betoninäytepalassa vallinneesta suhteellisesta kosteudesta tai painoprosentista punnitusmenetelmä ei välttämättä kerro kovinkaan tarkasti. Eri betonien sisältämä kosteuspitoisuus vaihtelee samassa suhteellisessa kosteudessa paljon riippuen vallitsevasta sorptiotilasta ja betonilaadusta. Näin ollen ilman kattavia tietoja tutkittavasta betonista ei punnitusmenetelmä ole kovin luotettava suhteellisen kosteuden määrittämiseen. (Merikallio 2009)

Punnitus-kuivaus-menetelmästä voidaan tehdä myös kevennetty versio, joka tehdään ilman kappaleen lämpökuivaamista. Punnitusmenetelmässä kappaleen painoa seurataan ajan kuluessa. Tällöin saadaan tietoa kappaleen muuttuvasta painosta ja sitä kautta myös kappaleen vesimäärän muutoksesta.

### 3.4.7 Kapasitanssimittaus valettavissa materiaaleissa

Vastaavasti kuin kapasitiivisella ilmankosteusanturilla, kapasitanssimittaus perustuu kahden sähköä johtavan kappaleen väliseen kapasitanssiin. Tässä mittausmenetelmässä anturin polymeerikalvon sijaan väliaineena toimii itse tutkittava materiaali. Kapasitanssimittauksessa periaate on se, että materiaalin permittiivisyys muuttuu kosteuspitoisuuden muuttuessa. Vastaavanlainen menetelmä on käytössä maalajien kosteusmittauksissa (Pavlik et al. 2006). Kapasitanssi riippuu käytetystä koejärjestelystä, mutta esimerkiksi kahden pyöreän toisistaan vakioetäisyydellä olevan johtimen välinen kapasitanssi voidaan määrittää kaavalla (kaava 3.2) (Cataldo et al. 2011):

$$C = \frac{\pi * \epsilon}{\ln\left(\frac{2d}{D}\right)}, \quad (3.2)$$

jossa  $d$  (m) on johtimen halkaisija ja  $D$  (m) on johtimien välinen etäisyys. Suure  $\epsilon$  ( $\text{Fm}^{-1}$ ) on väliaineen permittiivisyys, joka voidaan ilmoittaa  $\epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_R$ , jossa  $\epsilon_0 = 8.854 * 10^{-12}$   $\text{F/m}$  on ns. sähkövakio eli tyhjiön permittiivisyys. Väliaineen suhteellinen permittiivisyys  $\epsilon_R$  (-) tarkoittaa väliaineen permittiivisyyden suhdetta sähkövakioon. Joidenkin eri materiaalien suhteellisia permittiivisyyksiä on koottu taulukkoon 3.3.

**Taulukko 3.3** Joidenkin materiaalien suhteellisia permittiivisyyksiä (MAOL 2000, Pavlik et al. 2006)

Materiaali	Suhteellinen permittiivisyys $\epsilon_R$ (-)
Ilma, kuiva	1
Puu	3...7
Polystyreeni	2,6
Graniitti	7...9
Vesi, tislattu (20 °C)	81

Huokoisessa materiaalissa on käytännössä vakiomäärä kiinteää ainetta ja vaihteleva määrä vettä ja ilmaa. Tällaisen materiaalin permittiivisyyden määrittämiseen on esitetty (Pavlik et al. 2006) laskennallista kaavaa (kaava 3.3):

$$\varepsilon = \varepsilon_s^{\theta_s} \cdot \varepsilon_a^{\theta_a} \cdot \varepsilon_w^{\theta_w}, \quad (3.3)$$

jossa  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_a$  ja  $\varepsilon_w$  ( $\text{Fm}^{-1}$ ) ovat kiinteän aineen, ilman ja veden permittiivisyydet ja  $\theta_s$ ,  $\theta_a$  ja  $\theta_w$  (-) ovat kiinteän aineen, ilman ja veden suhteelliset osuudet kokonaistilavuudesta.

Laskennallisen tarkastelun lisäksi kapasitanssimittauksessa on hyvä olla käytössä tutkitavalle materiaalille tehty kapasitanssikäyrä, eli kalibroidut tulokset (Roels et al. 2004). Tällainen käyrä voidaan tehdä joko ennen koetta tai koejärjestelyn jälkeen. Koska kapasitanssin suuruuteen vaikuttaa väliaine (materiaali), kosteuspitoisuus ja käytetty mittaustavalla, täytyy kosteuspitoisuuden suhteen kalibroidusta koejärjestelystä pitää kaksi muuta muuttujaa tiedettyinä. Kalibroidut tulokset saadaan esimerkiksi asettamalla tutkitavasta materiaalista tehdyt koekappaleet tasoittumaan eri suhteellisiin kosteuksiin vakio-lämpötilassa. Kappaleiden tasoituttua kapasitanssin arvot mitataan käytettyä kapasitanssimittausjärjestelmää vastaavalla tavalla.

### 3.4.8 Virhelähteiden arviointi kosteusmittauksissa

Mittausepävarmuuksien arviointi on kosteusmittauksissa erityisen tärkeää, sillä epätarkkuutta mittaukseen voi aiheuttaa usea tekijä. Osa tekijöistä on systemaattisia ja osa satunnaisia. Erilaisia epävarmuuslähteitä on esitetty taulukossa 3.4.

Systemaattiset epävarmuudet muuttavat mittaustulosta saman verran samaan suuntaan koko tarkastelujakson ajan. Tästä syystä systemaattinen virhe voi olla mittaustuloksista hankala löytää, mutta mikäli sen suuruus tiedetään, voidaan mittaustulokset korjata korjauskerrointa käyttämällä. Systemaattiseksi virheeksi voidaan lukea esimerkiksi kosteusanturin kalibrointivirhe. (Merikallio 2009)

Satunnaisten epävarmuuksien suuruutta tai suuntaa ei välttämättä tiedetä, ja ne voivat vaihdella tarkastelujakson aikana. Satunnaisiksi epävarmuustekijöiksi luetaan esimerkiksi lyöntivirheet, epäselvät ohjeet tai mittaajan virheet. (Merikallio 2009)

**Taulukko 3.4** Kosteusmittauksiin liittyviä mittausepävarmuuksia, perustuu lähteeseen (Merikallio 2009).

<b>Mittausepävarmuuslähde</b>	
<b>Mittalaite</b>	Mittalaitteen epälineaarisuus (systemaattinen) RH mittapään hiipuma (systemaattinen) Mittapään hystereesi (satunnainen)
<b>Mittalaitteen kalibrointi</b>	Kalibrointilämpötila (systemaattinen) Suolaliuoksen ominaisuudet (satunnainen) Lämpötilamuutokset kalibroinnin aikana (satunnainen) Muut kalibroinnin aikana vaikuttavat tekijät (satunnainen) Kalibroinnin kokonaismittausepävarmuus (satunnainen)
<b>Mittalaitteen käsittely mittauksen aikana ja mittauksen välillä</b>	Mittaus eri lämpötilassa kuin kalibrointi (systemaattinen) Mittaushetken lämpötila eri kuin käyttölämpötila (systemaattinen) RH mittapään säilytys kuivissa olosuhteissa (systemaattinen) RH mittapään kosteuskapasiteetti porareiässä (systemaattinen) Lämpötilaero mittapään ja rakenteen välillä (systemaattinen) Porareiän tasaantuminen (systemaattinen) Materiaalin emäksisyys (systemaattinen) Lämpötilan muuttuminen mittauksen aikana (satunnainen) Kosteuden kondensoituminen mittausputkeen (satunnainen) Mittausreiän syvyyden vaihtelu (satunnainen)
<b>Mittaustulosten analysointi</b>	Väärin arvioitu rakenteen paksuus (satunnainen)

Mittausvirheen kokonaisepävarmuutta  $S_{tot}$  voidaan arvioida eri osatekijöiden avulla. Eri osatekijöiden vaikutus kokonaisepävarmuuteen voidaan määrittää kaavalla (kaava 3.4) (Merikallio 2009):

$$S_{tot} = \sqrt{(S_a^2 + S_b^2 + \dots + S_u^2)} \quad , \quad (3.4)$$

jossa  $S_a \dots S_u$  ovat eri osatekijöiden aiheuttaman epävarmuustekijöiden lukuarvo.

## 4. MATERIAALIT JA KOEJÄRJESTELYT

### 4.1 Laboratoriotutkimuksen kuvaus

Tutkimuksessa tarkasteltiin betonisten sisäkuorielementtien kuivumista eri lämmöneristemateriaaleja käytettäessä. Tarkasteltaviksi eristeiksi valittiin mineraalivilla, EPS ja PIR. EPS-eristeen avulla tutkittiin myös jälkieristämisen vaikutusta kuivumiseen. Tutkimuksessa tarkasteltiin lisäksi erilaisten valuvaiheen pintakäsittelymenetelmien vaikutusta sisäkuoren kuivumiseen. Näitä menetelmiä olivat 24 tunnin jälkihoito muovipeitteellä ja pystyvalu.

Tutkimuksessa haluttiin käyttää jatkuvatoimisia mittauksia betonin kosteuspitoisuuden muutoksen seuraamiseen. Vaikka jatkuvien mittausten tekeminen aiheuttaa aina tietynlaista häiriötä mitattavaan kohteeseen, häiriö pyrittiin minimoimaan.

Mittausmenetelmät valikoituivat sillä perusteella, että ne ovat kohtuullisella työmäärällä jatkuvasti toistettavissa, eikä niiden käyttö häiritse suurella määrällä koekappaleita. Näillä keinoilla pyrittiin varmistamaan koekappaleiden vertailukelpoisuus toisiinsa nähden koko mittausajanjaksona. Tässä koejärjestelyssä päädyttiin seuraaviin mittausmenetelmiin:

- Punnitus
- Kapasitiiviset kosteusanturit valuun sijoitettuihin muoviputkiin asennettuna
- Resistiiviset kosteusanturit valuun sijoitettuna
- Kapasitanssimittaus
- Porareikämittaus

Koekappaleita seurattiin n. 150 vuorokauden ajan kappaleiden valusta alkaen. Koska porareikämittaus on ainetta rikkova menetelmä ja siten häiritsee koekappaleiden kosteuspitoisuuden normaalia muutosta, porareikämittaukset tehtiin kappaleille vasta tutkimuksen lopuksi.

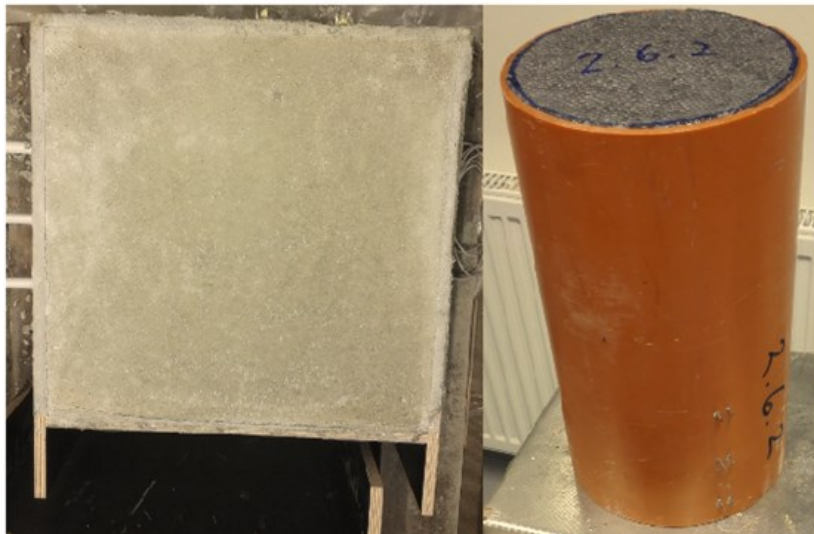
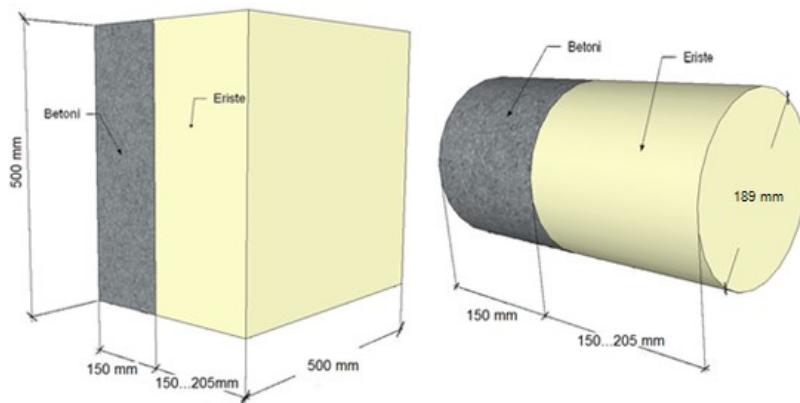
### 4.2 Tutkitut rakenteet ja koekappaleet

Koekappaleiden pitkäaikaisseurantaa varten tehtiin kaksi erilaista koekappalesarjaa. Toisessa koekappalesarjassa oli lieriönmuotoiset kappaleet ( $d = 187 \text{ mm}$ ) ja toisessa oli neliskanttiset ( $500 \times 500 \text{ mm}^2$ ) koekappaleet (kuva 4.1). Tutkittavien rakenteiden rakenne- ja koekappaletyypit on esitetty taulukossa 4.1.

**Taulukko 4.1** Rakenne- ja koekappaletyypit

Koekappale	Eristemateriaali	Eristeen paksuus (mm)	Kokonaispaksuus (mm)	Lieriökoekappale	Neliökoekappale	Lisätietoja
1	Mineraalivilla	205	355	kyllä	kyllä	-
2	PIR	150	300	kyllä	kyllä	-
3	PIR	150	300	kyllä	kyllä <sup>1)</sup>	Eristeen muovikalvot poistettu
4	EPS	200	350	kyllä	kyllä	-
5	EPS	200	350	kyllä	kyllä	Eriste asennettu 14 vrk valusta
6	EPS	200	350	kyllä	kyllä	Eriste asennettu 28 vrk valusta
7	-	-	150	kyllä	kyllä	-
8	-	-	150	ei	kyllä	Valusuunta eri kuin muissa
9	-	-	150	ei	kyllä	Betoni muovilla peitettynä 24h

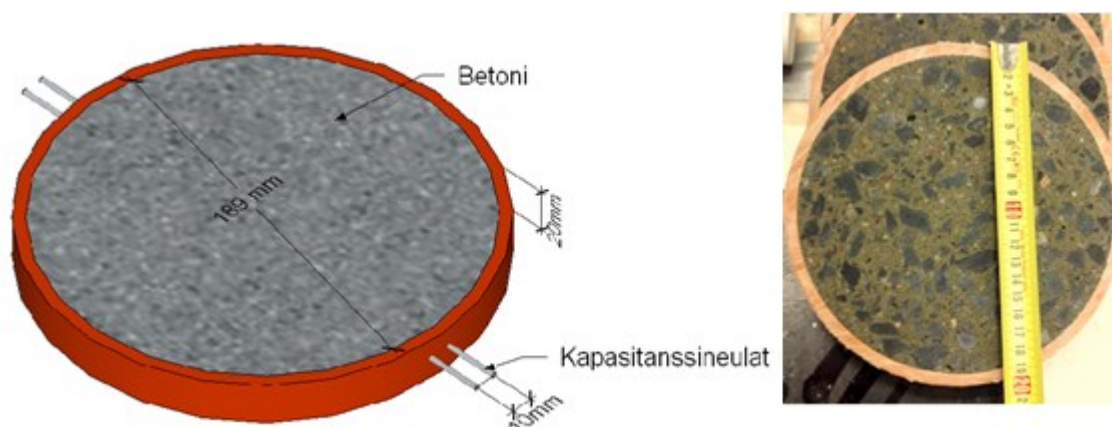
1) Ainoastaan testikoesarjassa

**Kuva 4.1** Koekappaleiden mittakaaviot (ylhäällä) ja esimerkkikuvat (alhaalla), vasemmalla puolella neliökoekappale ja oikealla lieriökoekappale

Koekappaleista tehtiin ensin testikoesarja. Testikoesarjaan kuului lieriökoekappaleet ja neliökoekappaleet rakennetyypeistä 1-7. Tällä koesarjalla oli tarkoitus selvittää yleisesti koearjestelyn toimivuutta ja mitta-anturien toimintaa betonin korkeassa suhteellisessa kosteudessa. Testikoesarjan perusteella tehtiin varsinainen koesarja neliökoekappaleilla rakennetyypeistä 1-2 ja 4-9. Varsinaisen koesarjan koekappaleiden yksityiskohtaiset rakennetyypit on esitetty liitteessä A.

Lieriökoekappaleita tehtiin kolme kappaletta kutakin rakennetyypistä. Neliökoekappaleita tehtiin yksi kappale kutakin rakennetyypistä. Puristuslujuuden määrittämistä varten tehtiin kaksi kolmen kappaleen sarjaa puristuskuitiokappaleita. Lisäksi kapasitanssineulojen kalibrointikappaleita (kuva 4.2) tehtiin kolme kolmen kappaleen sarjaa ohuita lieriökoekappaleita. Myös jokaisesta eristelaadusta oli vertailupunnituskappale samassa kosteushuoneessa koekappaleiden kanssa.

Lieriökoekappaleita ja kapasitanssineulojen kalibrointikappaleita ei tehty varsinaiseen koesarjaan, vaan niihin liittyvät tulokset ovat peräisin testikoesarjasta. Muilta osin esitetyt tulokset ovat varsinaisesta koesarjasta.



**Kuva 4.2** Kapasitanssimittausten vertailukoekappaleet

#### 4.2.1 Betoni

Itse tehdyssä valussa käytettiin betonitehtaalta (Rudus Oy) tilattua valmisbetonia. Käytetty betoni pyrittiin valitsemaan niin, että se vastasi elementtitehtailla seinäelementteihin käytettävää betonia. Betonia tilattiin 1 m<sup>3</sup>, joka oli noin 300 litraa yli tarpeen. Tällä menettelyllä pyrittiin varmistamaan betonin tasalaatuisuus, kun koekappaleisiin käytetty betoni voitiin ottaa toimituserän keskeltä.



Tilauskirjaan merkittiin betonille seuraavat vaatimukset:

- Lujuus C40/50
- Nopeasti kovettuva betoni
- Maksimiraekoko 16 mm
- Notkeus S3
- Suunniteltu käyttöikä 50 vuotta
- Rasitusluokka XC1
- Lisätiedoksi mainittiin käyttökohteeksi seinäelementti

Betoni tilattiin samoilla vaatimuksilla sekä testikoesarjaan että varsinaiseen koesarjaan. Betonin reseptitietoja ei julkaista niiden salassapitosopimuksen vuoksi. Mainitaan kuitenkin, että käytetyn betonin vesisementtisuhde oli testikoesarjassa 0,449 ja varsinaisessa koesarjassa 0,431.

#### 4.2.2 Eristysmateriaalit

Eristysmateriaaleiksi (kuva 4.3) valittiin kolme nykyään käytettävää, toisistaan kosteusteknisesti poikkeavaa eristelaatua. Eristeiksi päädyttiin valitsemaan mineraalivilla, EPS ja PIR. Lämmönvastukseltaan eristeiden paksuudet valittiin siten, että niitä käyttämällä rakennetyypit vastaavat vähintään Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 (2012) esitettyjä ulkoseinän vertailuarvoja. Tutkimuksessa käytettävien eristeiden materiaaliominaisuuksia on taulukoituna taulukossa 4.1. Taulukon arvot on poimittu materiaalivalmistajien internet-sivuilta ja kirjallisuudesta.

**Taulukko 4.2** Tutkimuksessa käytettyjen eristeiden lämpö- ja kosteusteknisiä ominaisuuksia

Eriste	Eristeen paksuus (mm)	Vesihöyrynvastus $Z_p \cdot 10^{10}$ (m <sup>2</sup> sPa/kg)	Lämmönvastus R (m <sup>2</sup> K/W)
Paroc Cortex One	205	0,036	6,2
FF-EPS 60S	200	2,9...4,0 <sup>1)</sup>	6,5
FF-PIR PLK	150	13...150 <sup>2)</sup>	6,5

1) Materiaaliominaisuus on johdettu kirjallisuuslähteestä (RIL 255-1-2014)

2) Materiaaliominaisuus on johdettu kirjallisuuslähteestä (Laine 2010)

#### Mineraalivilla

Mineraalivilla on lasi- tai kivimateriaalista prosessoitua eristettä. Se tehdään sulattamalla mineraalimateriaali korkeassa lämpötilassa ja tämän jälkeen linkoamalla tai puhaltamalla muodostunut mineraalisula ohuiksi (4...12 µm) kuiduiksi. Kuidut sidotaan toisiinsa orgaanisella sideaineella. Usein mineraalivillat käsitellään lisäksi öljyllä pölyämisen estämiseksi ja vedenhylkivyyden parantamiseksi. (RIL-255-1-2014)

Mineraalivilla ei sido itseensä kapillaarisesti vettä ja sitoo hygroskooppisesti vettä itseensä hyvin vähän. Vesihöyrynvastus  $Z_v$  vaihtelee mineraalivilloilla välillä 2200 s/m (lasivilla) - 1900 s/m (kivivilla). (RIL-255-1-2014)

Tutkimuksessa käytettäväksi eristeeksi valittiin Paroc Cortex one -kivivillalevyeriste. Eriste koostuu kivivillasta ja ulkopinnassa olevasta vesihöyryä läpäisevästä pinnoitteesta. Eriste saatiin suoraan valmistajalta. Valmistajan ilmoittama vesihöyrynvastus on  $Z_p = 0,036 \cdot 10^{10} \text{ m}^2\text{sPa/kg}$  ja lämmönjohtavuus  $\lambda = 0,033 \text{ W/(mK)}$ .

### **Paisutettu polystyreeni (EPS)**

EPS eli paisutettu polystyreeni on umpisoluinen, pienistä lasimaisista ponnekaasua sisältävistä polystyreenihelmistä koostuva solumuovieriste. Helmet saadaan toisiinsa kiinni vesihöyryn avulla paisutettuna. Valmis EPS-eriste sisältää 98 % kokonaistilavuudestaan ilmaa. (RIL-255-1-2014)

EPS-eristeiden lämmöneristysominaisuuksia voidaan parantaa lisäaineilla. Yleisimmin käytössä olevat lisäaineet ovat grafiitti ja nokimusta. Lisäaineiden käyttö perustuu niiden lämpösäteilyn absorboimiskykyyn. (RIL-255-1-2014)

EPS ei sido kapillaarista vettä ja sen hygroskooppisen kosteuden sitominen on hyvin vähäistä. EPS-eristeiden vesihöyrynläpäisevyys ei ole niin suuri että niitä voisi käyttää höyrynsulkuna. (RIL-255-1-2014)

Tutkimuksessa käytettäväksi eristeeksi valittiin FF-EPS 60S. Eriste on grafiittia sisältävä EPS-eriste. Eriste saatiin valmistajalta. Valmistajan ilmoittama vesihöyrynläpäisevyys on  $\delta_p = 2,5 \dots 5,5 \cdot 10^{-12} \text{ kg/(m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa)}$ . Kirjallisuuslähde RIL-255-1-2014 ilmoittaa EPS60S-eristeelle hieman valmistajaa suuremman vesihöyrynläpäisevyyden  $\delta_p = 5 \dots 7 \cdot 10^{-12} \text{ kg/(m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa)}$ . Valmistajan ilmoittama eristeen lämmönjohtavuus on  $\lambda = 0,031 \text{ W/(mK)}$ .

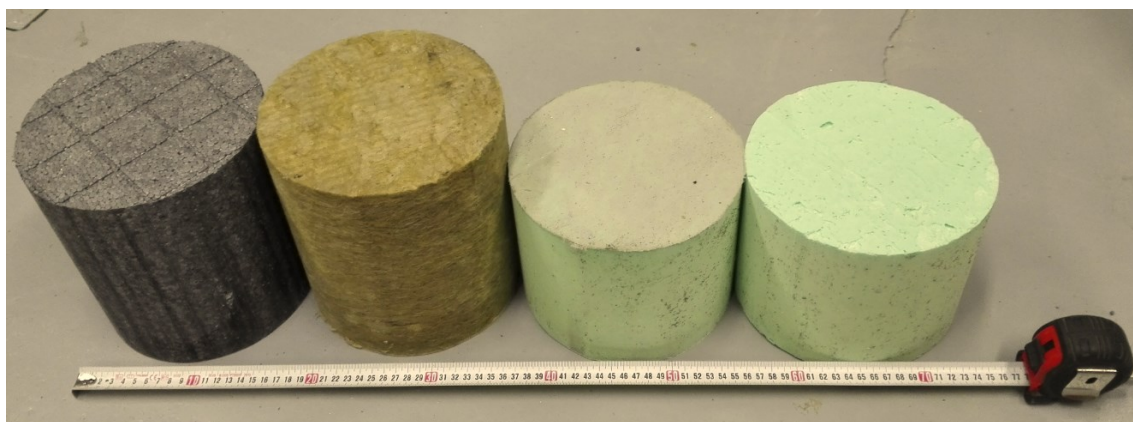
### **Polyuretaani (PUR/PIR)**

Polyuretaani on kova, umpisoluinen solumuovieriste. Polyuretaanisolumuovieristeiden raaka-aineita ovat polyoli, MDI ja ponneaine. PIR-eristeet sisältävät myös polyisosyanyraattia polyuretaanin lisäksi.

Polyuretaanin lämmöneristyskyky perustuu eristeen soluissa olevan kaasuseoksen lämmöneristyskykyyn. Polyuretaanieristeiden vesihöyrynläpäisevyys on pieni ja se soveltuu tavallisesti käytettäväksi höyrynsulkuna (RIL-255-1-2014).

Tutkimuksessa käytettäväksi eristeeksi valittiin FF-PIR PLK. Eriste on molemmilta puolilta diffuusiotiivillä laminaatilla päällystetty PIR-eriste. Eriste saatiin valmistajalta. Valmistajan ilmoittama lämmönjohtavuus on  $\lambda = 0,023 \text{ W/mK}$ . Materiaalivalmistajalta ei saatu tarkkaa tietoa käytetyn eristeen vesihöyrynläpäisevyydestä, joten taulukkoon on ke-

rätty kirjallisuudesta (Laine 2010) paperilaminaattipintaiselle PUR-levyeristeelle esitetystä vesihöyrynläpäisevyydestä  $\delta_p = 0,1 \dots 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ kg/(m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa)}$  johdettu vesihöyrynvastuksen arvo.



**Kuva 4.3** Käytetyt eristemateriaalit vasemmalta oikealle: FF-EPS, Paroc Cortex One, FF-PIR ja FF-PIR ilman diffuusiotiivistä kalvoa, kuvan eristeet on leikattu lieriökoekappaleita varten lieriömuotoisiksi

## 4.3 Käytetyt mittausmenetelmät ja mittausepävarmuudet

### 4.3.1 Punnitus

Punnituskoekappaleiden koko valittiin sellaiseksi, että se on mahdollisimman suuri soveltuen kuitenkin käytettävän vaa'an mitta-alueelle 0...15 000 g. Tällä rajoituksella päädyttiin tekemään koekappaleista lieriömuotoisia ja halkaisijaltaan alle 200 mm. Näin tehdyn koekappaleen painoksi muodostui noin 11 kg ilman muotin ja eristeen painoa.

Lieriömuotoisten koekappaleiden punnitus suoritettiin Sartorius-merkkisellä vaa'alla (kuva 4.4). Vaa'an lukematarkkuus oli 0,1 g ja tutkittavan kappaleen maksimipaino 15 000 g. Vaaka kalibroitiin aika ajoin 10 000 g painoisella tarkistuspunnuksella, ja säätämällä vaaka siten, että vaa'an näyttämä oli  $10\,000,0 \pm 0,1 \text{ g}$ . Vaa'an säätäminen tapahtui vaa'assa olevien jalkojen korkeutta säätämällä.

Vaaka asetettiin liikkumattomalle, betonista rakennetulle alustalle. Ennen jokaista punnitusta vaaka putsattiin mahdollisesta liasta ja tarkistettiin, että vaaka näytti 0,0 g. Tarvittaessa vaa'an lukema nollattiin.

Punnituskoekappaleet punnittiin alkuvaiheessa kahden vuorokauden välein, ja jatkossa viikon välein. Ennen ensimmäistä punnitusta muottina toimineet muoviputket ja kuhunkin koekappaleeseen laitettavat tarvikkeet (kapasitanssineulat ja eristeet) punnittiin erikseen ja tulokset kirjattiin ylös. Tämä alkupainolukema vähennettiin jatkossa mitatuista punnitustuloksista. Näin pystyttiin seuraamaan pelkästään betonissa tapahtuvan painon, ja siten kosteuden, muutosta.

Eristeistä tehtyjä vertailupunnituskappaletta punnitsemalla saatiin selville, mikäli eristeessä olisi tapahtunut hygroskooppisen kosteuden vaihtelua. Eristeiden painoissa ei kuitenkaan havaittu muutosta tarkastelujakson aikana.



*Kuva 4.4 Tutkimuksessa käytetty vaaka*

Punnitus on koemenetelmänä yksinkertainen, ja se sisältää merkittäviä epätarkkuustekijöitä vain vaa'an kalibroinnista ja koekappaleiden säilytyksestä. Vaa'an säätämistä voi myös tehdä jatkuvasti, mikä parantaa kokeen pitkäaikaisuotettavuutta. Punnituskappaleita oli myös jokaista laatua kolme kappaletta, mikä tasaa mahdollista mittausvirhettä yksittäisten kappaleiden välillä.

### **4.3.2 Kapasitiiviset kosteusanurit**

Mittausputkeen sijoitetut kapasitiiviset kosteusanurit olivat tutkimuksen ensisijainen tutkimusmenetelmä suhteellisen kosteuden seuraamista varten. Tutkimuksessa käytetyt kapasitiiviset kosteusanurit olivat merkiltään ja malliltaan Rotconic HC2-S –kosteusanureita (kuva 4.5).



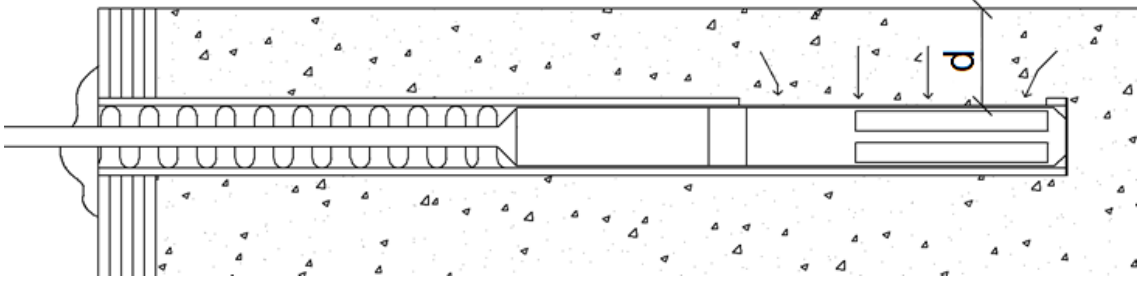
**Kuva 4.5** Rotronic HC2-S-kosteusanturi ja HL-NT3-dataloggeri

HC2-S -kosteusanturi koostuu Hygromer IN-1 -kosteussensorista ja Pt100-lämpötilasensorista. Kosteusdatan keräämistä varten käytössä oli Rotronic HL-NT3 tiedonkeruulaite eli dataloggeri, johon kukin anturi kiinnitettiin viiden metrin pituisella liitoskaapelilla. Dataloggerin lukeminen tapahtui tietokoneella Rotronicin omalla HW4-ohjelmalla.

Kapasitiivisia kosteusantureita varten koekappaleissa oli valmiina muoviputket määritetyissä syvyyksissä (kuva 4.6). Muoviputkeen oli jyrsitty reikä yhdeltä reunalta, josta kosteuden siirtyminen putkeen oli mahdollista (kuva 4.7).

Tässä tutkimuksessa käytössä olleet kapasitiiviset kosteusanturit eivät olleet uusia, vaan anturit kalibroitiin TTY:n omalla kalibrointilaitteistolla. Kalibrointi tapahtui käyttämällä vakioidussa lämpötilassa olleita kylläisiä suolaliuosastioita (kappale 4.4.1).





**Kuva 4.6** Mittaputken leikkauskuva, kuvassa  $d$  = tarkastelusyvyys



**Kuva 4.7** HC2-S-kosteusanturi mittaputkessa

Kosteusanturin johto eristettiin solumuovisella putkieristeellä, jotta mittauspisteeseen ei kohdistuisi lämmönvaihtelua. Putkieriste myös pienensi mittaputkessa olevaa ilmatilaa, jolloin tasaantumisen oletettiin olevan nopeampaa kuin ilman putkieristettä. Anturin asentamisen jälkeen anturin johto tiivistettiin mittaputkeen silikonilla. Silikonia käytettiin, koska haluttiin mahdollisimman tiivis ja pysyvä ratkaisu. Näin ollen kosteushuoneen mahdollinen muu käyttö ei herkästi häiritsisi mittausta.

Uuden anturin mittavirhe suhteelliselle kosteudelle on valmistajan mukaan  $\pm 0,8 \text{ \% RH}$  tutkimuksessa käytetyllä lämpötila-alueella (Rotronic 2016). Koska jokainen anturi tarkistettiin ennen ja jälkeen tutkimuksen, ja kosteuden muutossuunta oli sama kuin kalibroinnissa, voidaan pitkäaikaisstabiliteetin ( $< 1,0 \text{ \% RH/vuosi}$ ) ja hystereesin ( $< 0,5 \text{ \% RH}$ ) aiheuttamat epävarmuustekijät jättää laskennassa huomioimatta. Käytetään anturin mittausepävarmuuden määrittämiseen referenssianturin ja kunkin anturin virhettä referenssiantureihin nähden. Tutkimukseen hyväksyttiin anturit jotka näyttivät missä tahansa referenssipisteessä enintään  $\pm 3,0 \text{ \% RH}$  verrattuna referenssiantureihin. Näin ollen kapasitiivisten anturien mittausepävarmuuden enimmäisarvo kaavan 3.3 mukaan laskettuna oli

$$S_{\text{rotronic,max}} = \sqrt{(0,8^2 + (3,0^2))} = 3,1 \text{ \% RH.}$$

### 4.3.3 Resistiiviset valuanturit

Resistiiviset valuanturit haluttiin ottaa tutkimukseen siitä syystä, että niiden toiminta ei pitäisi häiriintyä korkeissa suhteellisissa kosteuksissa kovin herkästi. Valuantureina käytettiin Fuktcom FE102 -antureita (kuva 4.8). Valmistajan ilmoittama anturien mitta-alue on 64...100 % RH, - 20...+ 60 °C. Anturin kosteusmittaus perustuu resistanssin mittaamiseen anturin sisällä olevasta puupalasta. Anturin ilmoittama resistanssilukema muutetaan suhteellisen kosteuden lukemaksi dataloggerissa olevan ohjelmiston ja referenssiaineiston avulla.

Anturien lukemista ja datan säilyttämistä varten käytössä oli Fuktcomin oma dataloggeri. Koska saatavilla ei ollut kuin yksi dataloggeri, voitiin antureita ottaa tutkimukseen vain yhteen loggeriin mahtuva maksimäärä, eli 8 anturia. Valuantureita sijoitettiin yksi kappale jokaiseen koekappaleeseen mittaamaan kappaleen betonin keskiosan (mittaussyvyys 75 mm) kosteutta.



**Kuva 4.8** Fuktlog FE102 –kosteusanturi ja Fuktlog-dataloggeri

Valuanturit olivat tehdaskalibroituja. Anturitoimittajan kanssa käydyn sähköpostikeskustelun perusteella kalibrointi on tehtaassa suoritettu siten, että anturit kostutetaan suhteelliseen kosteuteen 100 % RH, ja annetaan sen jälkeen kuivua 85 % RH:ssa, joka on saatu aikaan suolaliuksella. Anturin saavutettua tasapainokosteuden ympäristönsä kanssa anturi hyväksytään, mikäli anturin osoittama mittaustulos on  $85 \pm 2,0$  % RH.

Valuanturit kasteltiin valmistajan ohjeen mukaan suhteelliseen kosteuteen 100 % RH vuorokauden ajan muovipussissa, jossa oli märkää paperia. Valuanturit otettiin pois muovipussista juuri ennen valua, jotta anturien puuosat eivät pääsisi kuivumaan. Näin varmistettiin anturissa olevan huokoisen materiaalin olleen märkää valutilanteessa, eikä kuiva anturi pääsisi imemään ympäröivästä betonista kosteutta.

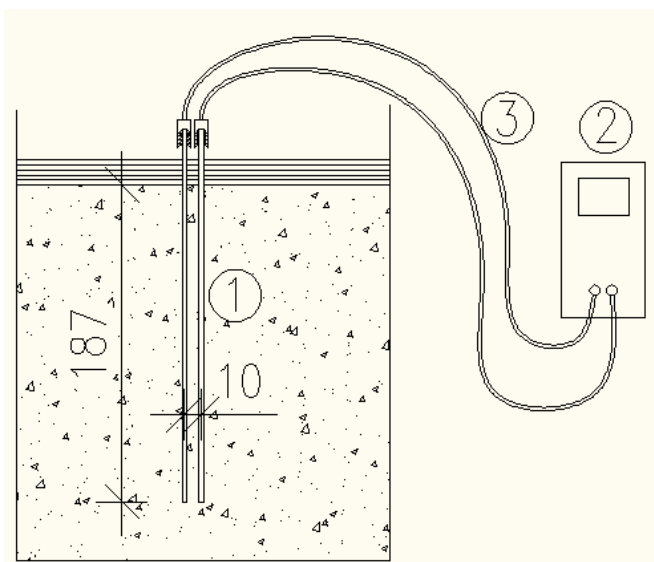
Koska antureille ei ollut olemassa käyttöohjetta, erilaisten osatekijöiden vaikutusta anturien kokonaispövarmuudeksi ei voida kovin tarkasti määrittää. Mittavirheeksi voidaan laskea kaavan 3.3 mukaan:

$$S_{fuktcom} = \sqrt{(2,0^2)} = 2,0 \% RH.$$

Mittausepävarmuus on resistiivisilläkin antureilla oletettavasti laskettua arvoa suurempi, mutta eri osatekijöiden puutteen vuoksi sitä ei voida matemaattisesti määrittää.

#### 4.3.4 Kapasitanssimittaus

Kapasitanssimittaus (kuva 4.9) valikoitui mittausmenetelmäksi siksi, että se on helposti ja pienellä taloudellisella panoksella suoritettavissa. Kapasitanssimittauksen luotettavuudesta ei ollut rakennusfysiikan tutkimusryhmässä juurikaan aiempaa kokemusta. Koejärjestelmä haluttiin kuitenkin ottaa testikäytössä tutkimukseen mukaan, sillä sen oletettiin tuottavan informaatiota kosteuspitoisuuden muutoksista betonissa korkeissa suhteellisissa kosteuksissa eli kapillaarisella alueella (98-100 % RH).



**Kuva 4.9** Tutkimuksessa käytetyn kapasitanssimittauksen periaatekuva: 1. Kapasitanssineulapari 2. Kapasitanssimittari 3. Sähköjohdot

Kapasitanssineuloina käytettiin halkaisijaltaan 2,5 mm olevia teräksestä määrämittaan leikkattuja lankoja. Neulat upotettiin koekappaleen sisään 187 mm ja niiden etäisyys toisistaan oli 10 mm neulan keskeltä keskelle mitattuna. Kapasitanssineuloja tehtiin kaksi paria mittaamaan jokaisen kappaleen jokaista mittaussyvyyttä.

Kapasitanssimittaus suoritettiin Agilent U1701A kapasitanssimittarilla (kuva 4.10). Mittarin napoihin kytkettiin sähköjohdot, jotka taas kiinnitettiin koekappaleissa olleisiin johtimiin.





**Kuva 4.10** Kapasitanssineulat ja käytetty kapasitanssin lukulaite

Kapasitanssin vertailukappaleet sahattiin pyöreästä sisähalkaisijaltaan 188,8 mm olevasta muoviputkesta. Vertailukappaleiden korkeus oli noin 20 mm. Kapasitanssineulat olivat näissäkin kappaleissa betonin sisällä 187 mm pituudella. Sahauksen jälkeen vertailukoekappaleet laitettiin tasoittumaan eri suhteellisiin kosteuksiin, jotka saatiin aikaan kyläisiä suolaliuoksia käyttämällä. Vertailukoekappaleiden saavutettua tasapainokosteuden ympäristönsä kanssa saatiin kapasitanssineuloista mitattua kutakin kosteuspitoisuutta vastaava kapasitanssin vertailuarvo.

Kapasitanssimittari asetettiin toimimaan mikrofaradien ( $\mu\text{F}$ ) lukualueelle. Muottivanerin aiheuttama kapasitanssi oli suuruusluokkaa 10 pF, joten muottivanerin aiheuttama kapasitanssi ei vaikuttanut merkittävästi mittaustuloksiin käytetyllä mitta-alueella. Mittarin mittavirhe käytettävällä lukualueella oli  $\pm (0,5 \% + 3) \mu\text{F}$  (Agilent 2008).

#### 4.3.5 Porareikämittaus

Koska porareikämittaus on materiaalia rikkova ja näin häiritsee merkittävästi koekappaletta, porareikämittaus tehtiin vasta loppukosteuspitoisuuksien määrittämistä varten. Porareikämittaukset pyrittiin tekemään RT-kortin 14-10984 ”Betonin suhteellisen kosteuden mittaus” ohjeiden mukaisesti. Porareikämittauksia tehtiin RT-kortin ohjeesta poiketen kuitenkin vain 1 kpl jokaisen kappaleen jokaisesta mittaussyvyydestä. Tämä poikkeus jouduttiin tekemään, koska koekappaleissa ei ollut tilaa useammille porareikäille muiden mittausmenetelmien vaatiman tilan vuoksi. Porareikämittauksessa käytettiin Vaisala HMP44-kosteusantureita ja antureiden lukemista varten käytössä oli Vaisala HMI41-lukulaite (kuva 4.11).

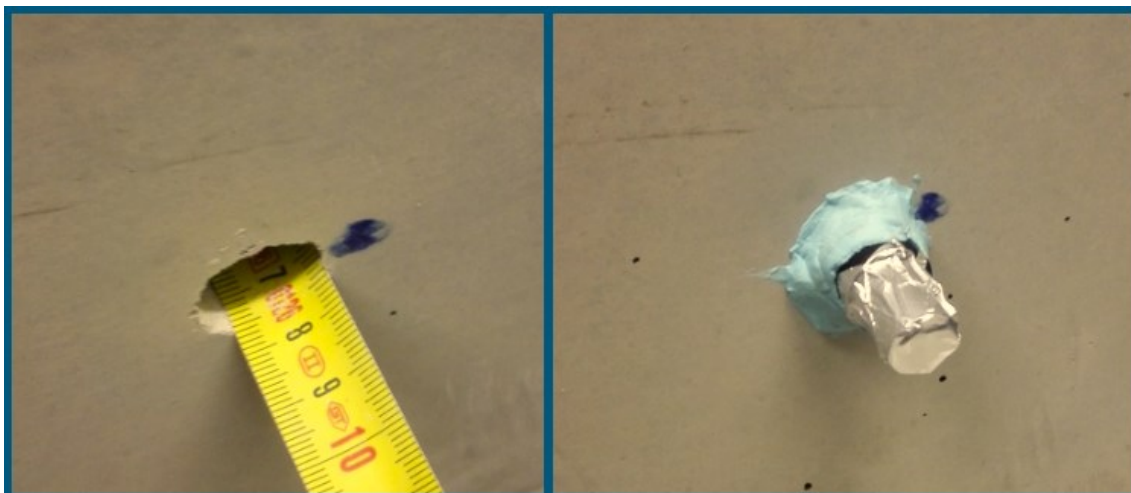


**Kuva 4.11** Vaisala HMP44-kosteusanturi ja HMI41-lukulaite

Porareikämittauksessa käytettiin toisiinsa tiivistettyjä 16 mm ja 20 mm jäykkiä muoviputkia, jotta porareikämittaus voitiin tehdä käytössä olleella 20 mm poranterällä. Jokaista eri tarkastelusyvyyttä varten valmistettiin sopivan pituinen muoviputki. Mittaputken asentamisen jälkeen mittaputken pää suljettiin alumiiniteipillä ja jätettiin tasoittumaan kolmen vuorokauden ajaksi (kuva 4.12). Tasoittumisen jälkeen kosteusanturi painettiin alumiiniteipin läpi, jotta mittaputki pääsisi häiriintymään mahdollisimman vähän anturin asennuksen yhteydessä. Anturin mittaustulosta seurattiin seuraavan vuorokauden ajan ja mittaustulos kirjattiin 24 h kuluttua anturin asentamisesta.

Käytetyt anturit oli kalibroitu alle puoli vuotta ennen mittauksia, mutta anturit tarkastettiin varmuuden vuoksi kuitenkin neljässä eri suolaliuoksessa käyttäen referenssinä Rotronic-antureidenkin kalibrointia varten käytössä olleita uusia HC2-S-referenssiantureita. Tarkastukset tehtiin ennen ja jälkeen mittauksen. Tutkimukseen hyväksyttiin HMP-44-kosteusantureihin sallittiin sama virhe referenssiantureihin nähden kuin Rotronicin antureissa, eli  $\pm 3,0 \text{ \% RH}$ . Koska porareikämittauksen mitta-anturien kalibrointi tehtiin samalla tavalla kuin kapasitiivisten anturien, niille voidaan käyttää samaa maksimiepävarmuuden arvoa:

$$S_{vaisala,max} = \sqrt{(0,8^2 + (3,0^2))} = 3,1 \text{ \% RH.}$$



*Kuva 4.12 Porareikä ja mittaputki tiivistettynä porareikään*

#### 4.3.6 Puristuslujuuden määrittäminen

Betonin puristuslujuus määritettiin TTY:n rakennushallin koelaitteistolla (kuva 4.13). Koekappaleita tehtiin 3 + 3 kpl, jotka olivat särmämitaltaan 150 mm kuutioita. Puolet kappaleista varastoitiin vesisäilytyksessä ja puolet varastoitiin muiden koekappaleiden kanssa samassa tilassa kosteushuoneessa. Koekappaleet puristettiin 28 vrk ikäisenä. Näiden koekappaleiden tarkoitus oli toimia vertailukappaleina kappaleiden säilytysolojen suhteen puristuslujuutta määritettäessä.

Tässä tutkimuksessa ei keskitytä tarkasti betonin lujuusominaisuuksiin. Kuitenkin määrittämällä kokeellisesti myös betonin lujuusominaisuudet, voitiin varmistaa tutkimuksessa käytetyn betonin vastaavuus yleisesti seinäelementeissä käytettävään betoniin verrattuna.

Puristuslujuuskoekappaleiden kaikki särmät mitattiin työntömitalla kolmesta eri kohtaa ja kunkin koekappaleen laskenta-arvoina käytettiin näiden mittausten keskiarvoa. Kaikki kappaleet myös punnittiin kappaleiden tiheyden määrittämistä varten.



*Kuva 4.13 Puristuskoe-kappale puristettavana TTY:n rakennushallissa*

## 4.4 Koekappaleiden valmistus ja säilytys

### 4.4.1 Esivalmistelut ja muotit

Punnituskoekappaleita tehtiin kolme samanlaista kappaletta kustakin rakennetyypistä. Punnituskoekappaleiden muotit tehtiin ulkohalkaisijaltaan 200 mm olevasta suorareunaisesta pvc-viemäriputkesta (kuvat 4.14 ja 4.18). Jokainen putki leikattiin oikeaan mittaansa siten, että putki vastasi kunkin eristeen ja betonin yhteenlaskettua vahvuutta. Leikkauksen jälkeen putket siistittiin muovipurusta.

Putkiin tehtiin kapasitanssineuloja varten 2,5 mm poranterällä reiät. Punnitusmuotteja varten leikattiin jokaisesta eristeestä lieriönmuotoiset kappaleet, jotka asennettiin muotteihin ja tiivistettiin reunoiltaan silikonilla. Kunkin punnitusmuotti ja muotteihin asennettavat tarvikkeet punnittiin erikseen ja numeroitiin tulosten jatkokäsittelyä varten.

Suhteellisen kosteuden seuraamista varten tehtävien koekappaleiden tarvittavat muotit (kuvat 4.16 ja 4.17) tehtiin 15 mm vesivanerista. Muottien kasaamisen jälkeen muotit muovitettiin sisäpuoleltaan vesihöyryä heikosti läpäisevällä rakennusmuovilla.



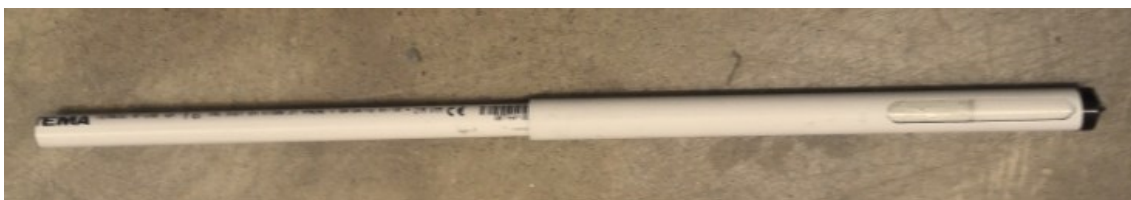


**Kuva 4.14** Punnituskoekappaleen muotti leikkurissa

Muottien sivuille porattiin reiät valittujen mittausten menetelmien asentamista varten. Rei'ittämistä varten käytettiin erikseen tehtyä sapluunaa, jonka avulla reikien sijoittelu saatiin vastaamaan toisiaan eri muottien välillä. Kaikki reiät tehtiin sapluunaa käyttämällä.

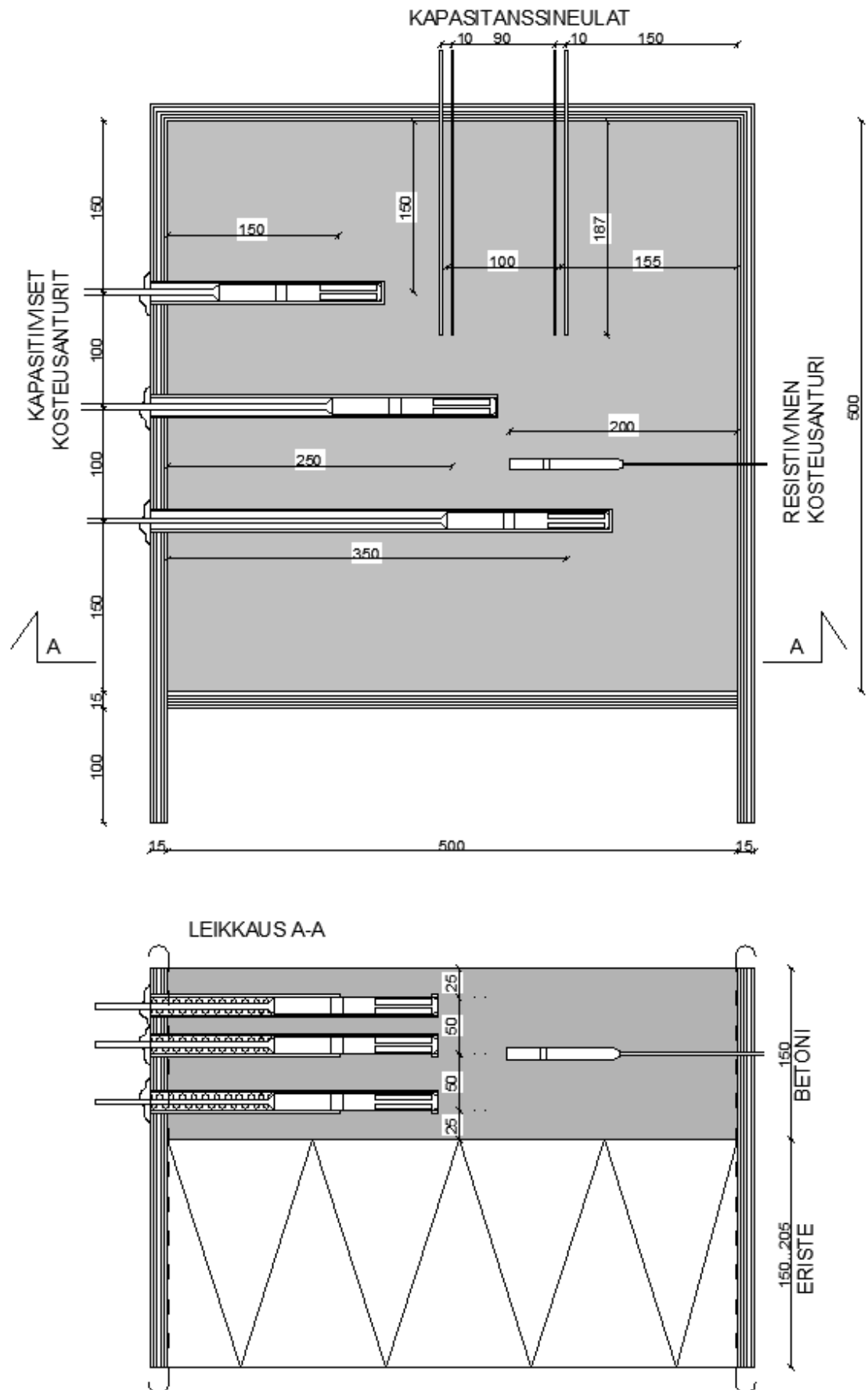
Mittaputkina käytettiin PVC-muovista tehtyjä sisähalkaisijaltaan 16 mm olevia putkia. Putkiin jyrsittiin 80 mm mittainen reikä yhdelle puolelle sivuun kosteudenvaihtopinnaksi, ja putken pää suljettiin vesihöyryä heikosti läpäisevällä teipillä. Mittaputket asennettiin muottivaneriin porattuihin reikiin, minkä jälkeen putken ja muotin välinen liitos tiivistettiin liimatiivistemassalla. Reiät porattiin siten, että sisemmän putken ulkoreuna mitattiin täsmäämään haluttua tarkastelusyvyyttä. Putkille tehtiin myös tukipalat tukemaan kutakin mittaputkea putken toisessa päässä haluttuun korkeuteen. Tukipalat tehtiin muovilevystä ja ne liimattiin sekä asennusputkeen että muottiin.

Mittaputkeen asennettiin valun ajaksi ulkohalkaisijaltaan 16 mm muoviputki estämään betonin joutuminen mittaasputkeen (kuva 4.15). Jokainen sisäputki tiivistettiin teipillä tarkasti vastaamaan kutakin ulkoputkea.

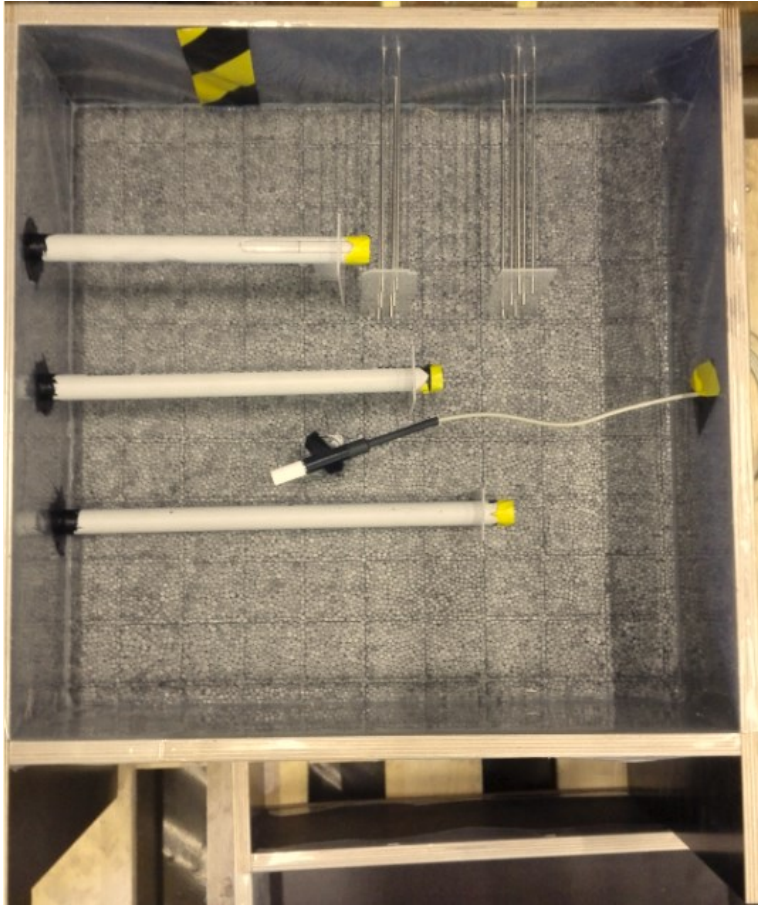


**Kuva 4.15** Mittaputki ja sen sisään asetettu sisäputki

Koekappaleiden muotteihin lisättiin lopuksi vanerilevy myös alapintaan valun ajaksi. Vanerin tarkoitus oli samalla sekä jäykistää muottia, että estää betonin poistuminen muotista valun aikana.



**Kuva 4.16** Koekappaleen mittalaitekaavio



**Kuva 4.17** Koekappaleen muotti tarvikkeineen, kuvassa EPS-eristetty koekappale

Eristeet asennettiin muotteihin valmiiksi, paitsi jälkieristetyissä kappaleissa. Eristeet leikattiin sivumitoiltaan 500 x 500 mm neliöiksi. Asentamisen yhteydessä eristeen ja muotin välinen sauma tiivistettiin silikonilla. Jälkieristettyihin kappaleisiin merkittiin teipillä 150 mm korkeus, jotta betonivalu osattiin tehdä oikean paksuisena.

Lisäksi ennen varsinaisten koekappaleiden valamista tehtiin pieniä testikappaleita kapasitanssineulojen ja valuun sijoitettavien muoviputkien käyttöä varten. Nämä testikappaleet tehtiin ns. säkkibetonista. Näillä testikappaleilla pyrittiin havaitsemaan ongelmia, joita saattaisi syntyä esimerkiksi anturien putkeen sijoittamisesta. Samalla haarukoitiin kapasitanssineuloille sopivaa etäisyyttä toisistaan. Kapasitanssineulojen asteikko haluttiin mahdollisimman suureksi, jotta niistä voisi havaita eroja, mikäli muutokset olisivat erittäin pieniä.



***Kuva 4.18** Valumuotteja, vasemmalla lavalla punnitus- ja puristuslujuuskoekappaleiden muotteja, oikealla suurempien koekappaleiden muotteja*

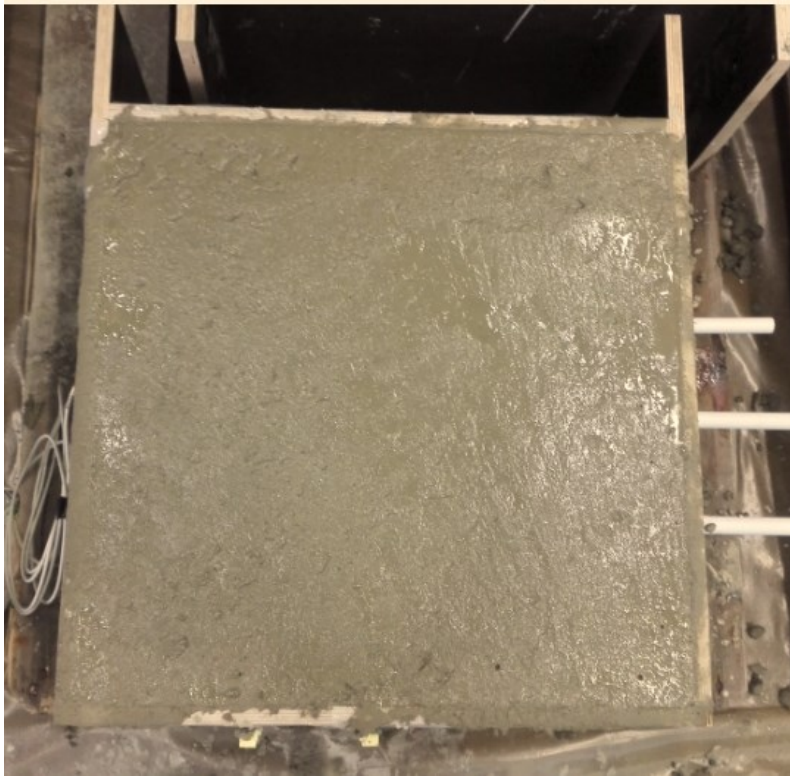
#### **4.4.2 Valun suoritus ja betonipintojen käsittelyt**

Koekappaleiden valu (kuva 4.19) suoritettiin TTY:n rakennushallissa rakennushallin henkilökunnan avustuksella. Betoni tuotiin betoniautolla, josta sitä edelleen siirrettiin muotteihin kottikärryjen ja kauhojen avulla. Betonin valamiseen kului aikaa noin tunti. Muotit valettiin täyteen paitsi jälkieristettyjen koekappaleiden osalta, joissa betoni valettiin muottiin aiemmin merkittyyn valusyvyyteen asti. Valut tärytettiin sauvatäryttimellä, minkä jälkeen tarkistettiin vielä, että kukin betonivalu oli oikean vahvuinen.

Valun jälkeen betonin annettiin sitoutua noin tunnin ajan. Riittävän sitoutumisen jälkeen betonipinnat teräshierrettiin mahdollisimman siisteiksi. Hierron jälkeen betoni jätettiin kovettumaan seuraavaksi vuorokaudeksi. Koekappaleiden betonille ei tehty erillistä jälkihoitoa, sillä näin elementtitehtailta saadun tiedon mukaan on tapana tehdä elementtitehtaissa.

Betonivalun kovettuttua tehtiin kolme eri työvaihetta (kuva 4.20). Ensimmäisenä käsittelemättömät betonipinnat hiottiin hiomakoneella. Näin tehtiin, jotta betonipintaan noussut sementtiliima saatiin poistettua. Hiomistyövaihe koski kaikkia näkyville jääviä pintoja, jotka eivät olleet muottipintoja. Näin ollen hiotut pinnat olivat valuvaiheessa eristettyjen kappaleiden yläpinta, muovitetun kappaleen yläpinta ja betonikuorikappaleen yläpinta. Jälkieristetyistä kappaleista ei hiottu kumpaakaan pintaa, sillä muottipinta oli samalla ainoa näkyville jäävä pinta. Pystyvaletun kappaleen kumpaakaan pintaa ei hiottu, sillä molemmat näkyvät pinnat olivat muottipintoja.

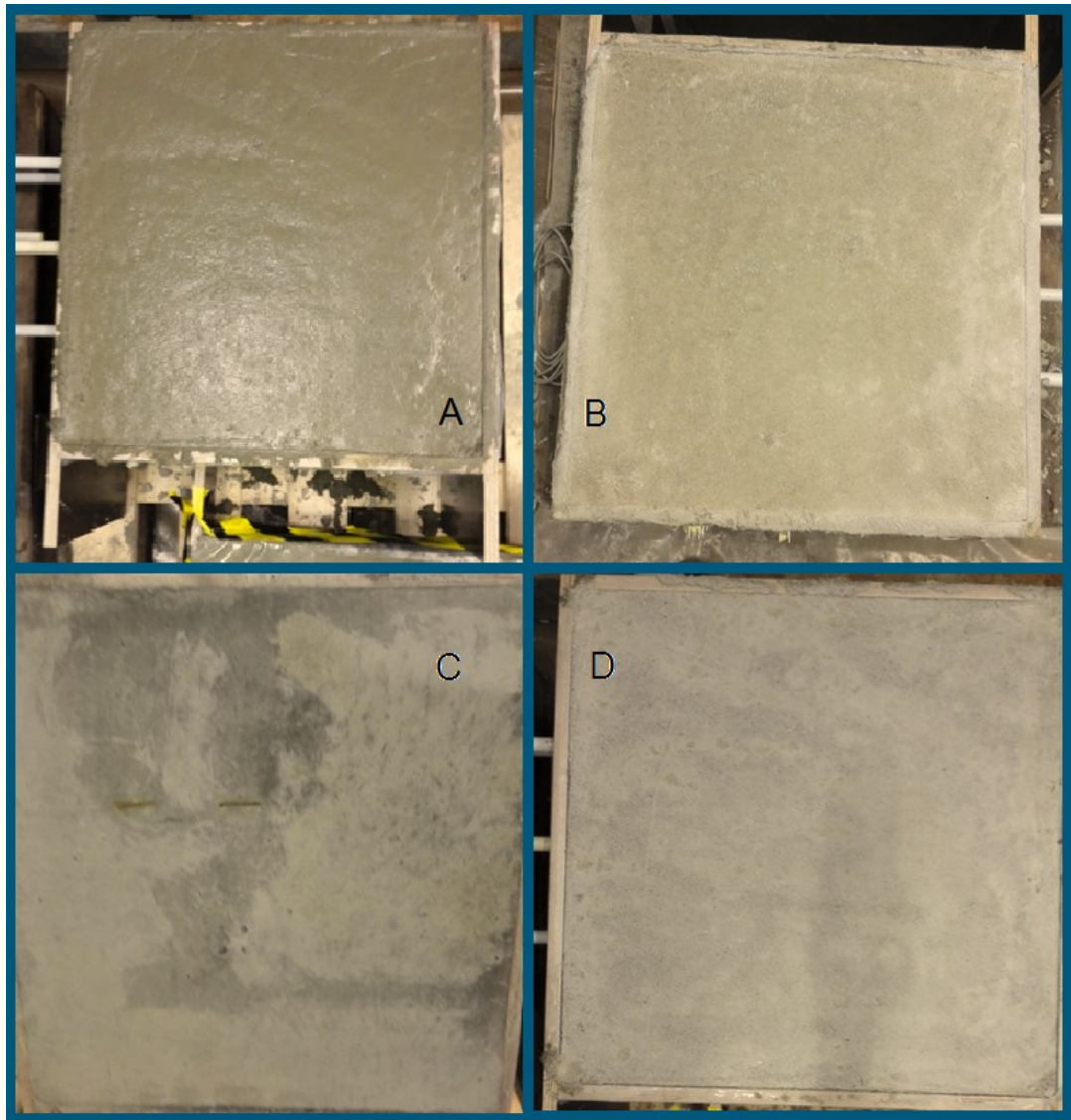




**Kuva 4.19** Koekappale valettuna

Seuraavaksi betonikappaleiden muotit purettiin. Purkamisvaiheessa poistettiin kaikkien kappaleiden alapinnassa ollut vaneri. Pystyvaletun kappaleen sekä etu- että takapinnat sulkeneet vanerit poistettiin.

Viimeisenä työvaiheena betonivalussa kapasitiivisia kosteusantureita varten olleiden muoviputkien sisäputket poistettiin. Osa sisäputkista oli juuttunut erittäin tiiviisti betoniin, eikä niitä saatu vielä ensimmäisen vuorokauden aikana irrotettua. Voimatyökalujen käyttöä vältettiin, sillä koekappaleita ei haluttu vaurioittaa. Putket saatiin irroitettua kuitenkin sisäputken sisään asetetun teräsputken avulla. Kunkin sisäputken irroittamisen yhteydessä ulkoputki tiivistettiin päästään silikonilla, jotta putkesta ei pääsisi vuotamaan kosteutta ulos.



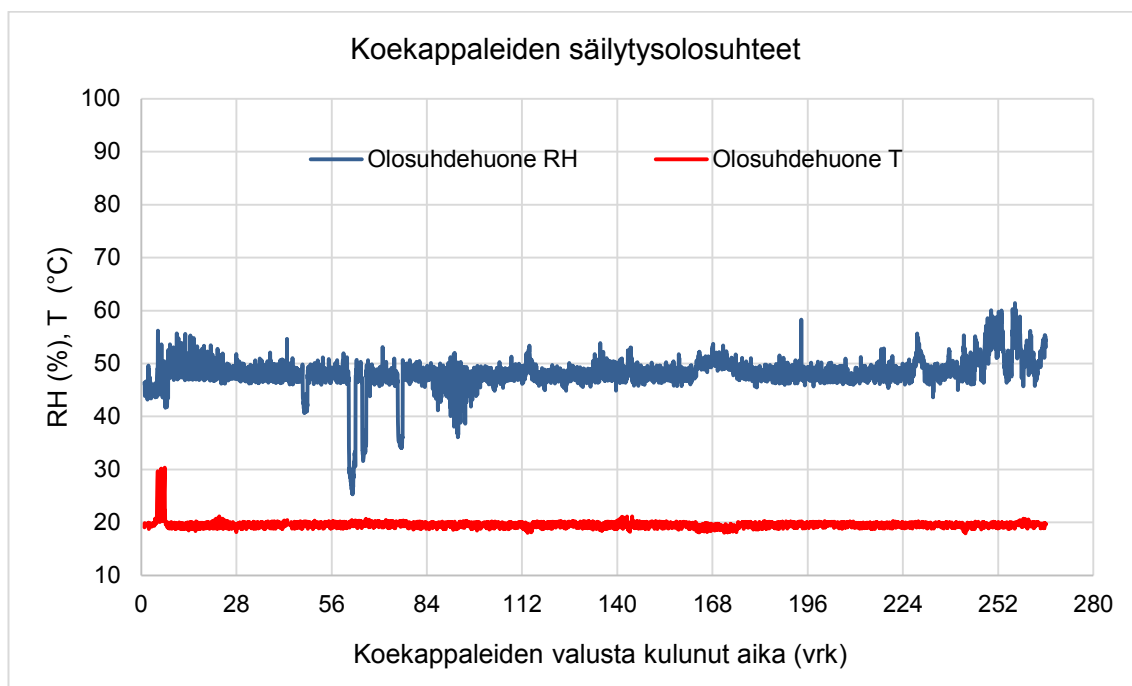
**Kuva 4.20** Betonin pintoja: A = Vastavalettu betonipinta teräshierrettynä, B = betonipinta kovettuneena, C = Tuore muottipinta, D = Hiottu betonipinta

#### 4.4.3 Koekappaleiden säilytys ja tarkastelu

Koekappaleet siirrettiin valupaikalta TTY:n rakennuslaboratoriossa sijaitsevaan kosteushuoneeseen (kuva 4.22) noin 48 h valun jälkeen. Kosteushuoneeseen säädettiin vakioolosuhteet 50 % RH, + 20 °C. Kosteushuoneeseen asetettiin myös yksi Rotronic HC2-S-anturi seuraamaan kosteushuoneessa kullakin ajanhetkellä vallinneita olosuhteita (kuva 4.21).

Kosteushuoneen suhteellinen kosteus ja lämpötila pysyivät tarkastelujaksolla melko hyvin tavoitearvoissa. Lämpötilan osalta heti kokeen alkuvaiheessa kosteushuoneen lämpötila nousi tavoitetta korkeammalle tasolle tuoreiden koekappaleiden mahdollisesti aiheut-

taessa häiriötä kosteushuoneen ohjausjärjestelmään. Suhteellisen kosteuden osalta mitausjaksolle tuli muutamia tavoitekosteutta alhaisempia jaksoja, mutta pääosin kosteushuone toimi toivotulla tavalla.



**Kuva 4.21** Koekappaleiden säilytysolosuhteiden seuranta

Kun koekappaleet oli siirretty kosteushuoneeseen, kytkettiin resistiiviset anturit dataloggeriin. Dataloggeri asetettiin loggaamaan tunnin välein.

Kapasitiivisia kosteusantureita alettiin asentamaan putkiin heti kun kappaleet oli viety kosteushuoneeseen. Kosteusantureita sijoitettiin muoviputkiin siinä järjestyksessä kuin rakenteen kuivumisen oletettiin tapahtuvan. Ensimmäisenä aloitettiin lähimpänä vapaata betonipintaa olleista mittausputkista ja myöhemmin siirryttiin asentamaan antureita myös tiiviiden eristeiden pintaosissa ja koekappaleiden keskiosissa sijainneisiin mittausputkiin.

Aiemmin oli havaittu, että käytössä olleet kosteusanturit menivät herkästi epäkuntoon, mikäli mittapää oli liian pitkään korkeassa suhteellisessa kosteudessa (lähes 100 % RH). Antureita ei siksi haluttu sijoittaa liian märkään betoniin. Osassa syvemmällä olleista putkista suhteellinen kosteus nousi anturin näyttämän lukeman mukaan 100 % RH suhteelliseen kosteuteen. Mikäli näin tapahtui, avattiin putki ja anturi vaihdettiin uuteen.

Koekappaleisiin asennettiin jo valuvaiheessa resistiiviset kosteusanturit ja kapasitanssineulat. Kapasitanssineulat luettiin ensimmäisen kerran jo heti valun suorittamisen jälkeen. Kun koekappaleet oli siirretty kosteushuoneeseen, kytkettiin resistiiviset anturit dataloggeriin.



**Kuva 4.22** Koekappaleet kosteushuoneessa: kuvassa alhaalla suuret koekappaleet, hyllyille sijoiteltuna punnituskoekappaleita

Kun kaikki kosteusanturit oli saatu asennettua, eikä suhteellinen kosteus enää missään putkessa noussut 100 % RH suhteelliseen kosteuteen, jatkettiin kuivumisen seuraamista koekappaleita häiritsemättä.



## 4.5 Koejärjestelmän lisätarkastukset

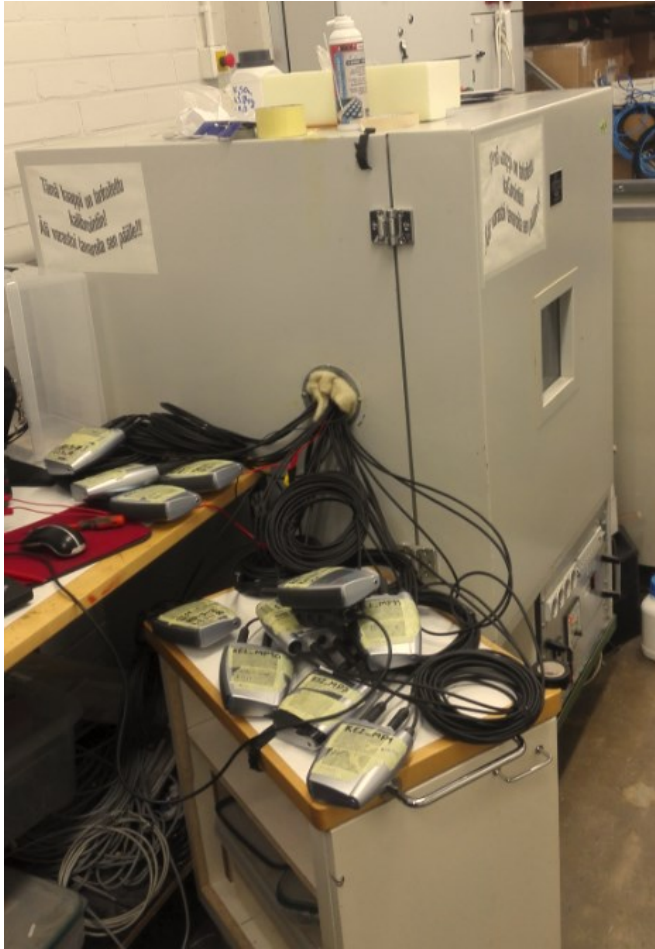
### 4.5.1 Kapasitiivisten kosteusantureiden säätö ja kalibrointi

Kapasitiiviset kosteusanturit kalibroitiin ennen koetta. Kalibrointi tehtiin ensin lämpötilan ja sen jälkeen suhteellisen kosteuden suhteen. Kalibrointi tapahtui säätämällä tutkimuksessa käytetyt kosteusanturit vastaamaan referenssipisteitä tehdaskalibroittujen referenssiantureiden avulla.

Kalibroittavat ja referenssinä toimineet kosteusanturit asetettiin kannelliseen, sinitarralla ja teipillä tiivistettyyn muoviasastiaan, jossa oli ionivaihdettuun veteen tehty kylläinen suolaliuos ja tuuletin (kuva 4.23). Itse muoviasastia sijoitettiin lämpötilavakioituun kaappiin (kuva 4.24). Lämpötilojen kalibrointiin käytetyt tavoitereferenssilämpötilat olivat 5 °C ja 20 °C, koska tutkimuksen tutkimuslämpötila oli noin 20 °C. Suolaliuoksia tehtiin neljästä eri suolasta ja niiden muodostamat tavoitellut suhteelliset kosteudet olivat 20 °C lämpötilassa 97 % RH ( $K_2SO_4$ ), 85 % RH (KCl), 57 % RH (NaBr) ja 33 % RH ( $MgCl_2$ ). Näin saatiin tarkistettua tutkimuksen oletettu suhteellisen kosteuden vaihteluväli 50-100 % RH.



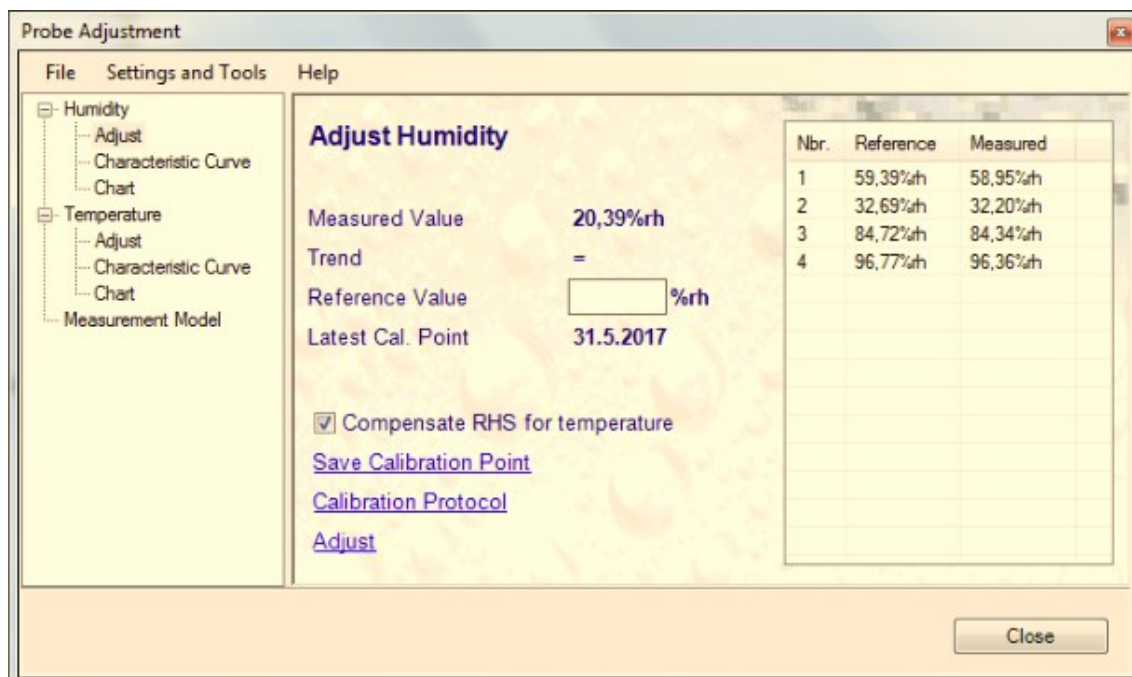
*Kuva 4.23 Kapasitiiviset kosteusanturit suolaliuosastiassa lämpötilakaapissa*



**Kuva 4.24** Anturit vietiin lämpötilakaappiin lämpöeristetyin reiän läpi.

Referenssipisteiden määrittämiseen käytettiin eri puolille astiaa sijoitettuja tehdaskalibroituja Rotronic HC2-S antureita. Anturien annettiin tasaantua kuhunkin lämpötilaan ja suhteelliseen kosteuteen 6-8 tuntia, ja kukin referenssipiste laskettiin referenssiantureiden viimeisen tunnin näyttämän lukeman keskiarvona. Referenssipisteet tallennettiin kalibroivien anturien muistiin (kuva 4.25), jolloin anturi tallensi myös saman hetken oman mittauslukemansa. Lopuksi kalibroivien anturien lukemat säädettiin HW4-ohjelman avulla vastaamaan referenssipisteitä.

Säädön jälkeen tehtiin vielä kalibrointikierrös kaikissa neljässä suolaliuoksessa. Tutkimukseen hyväksyttiin anturit, joiden näyttämän erotus referenssiantureihin nähden oli missä tahansa tarkastelupisteessä enintään  $\pm 3,0$  % RH,  $\pm 0,2$  °C.



**Kuva 4.25** Kuvakaappaus HW4-ohjelmasta, jossa on esitetty Rotronic HC2-S anturin referenssipisteitä.

Kapasitiivisten kosteusantureiden lopputarkistus tehtiin vastaavanlaisesti kuin kalibrointikin, eli samoja suolaliuoksia ja lämpötilakaappia käyttämällä. Mikäli jossakin anturissa havaittiin poikkeamia referenssiantureihin nähden, tehtiin lopputarkistuksessa useampi tarkistuskierros säätämättä antureita vastaamaan referenssiantureita. Tällä menettelyllä pyrittiin seuraamaan mahdollista anturien kontaminaatiota ja kontaminoitumisen vaikutuksen muutosta kokeen jälkeen.

#### 4.5.2 Tiivistykseen käytetyn silikonin vaikutus mittaustuloksiin

Kokeen lopuksi haluttiin vielä tarkistaa, oliko tiivistämiseen käytetyssä silikonilla vaikutusta mittaustuloksiin. Tätä varten tehtiin kaksi koesarjaa, joista toisessa selvitettiin silikonin vaikutusta yleisesti suhteelliseen kosteuteen ja toisessa käytettyyn mittaamenetelmään.

Ensimmäiseen koesarjaan (kuva 4.26) laitettiin uudelleen kalibroidut anturit kahteen samanlaiseen muoviasastiaan, joihin molempiin laitettiin kylläinen suolaliuos (KCl, n. 85 % RH). Antureiden annettiin tasoittua vuorokauden ajan, joka havaittiin riittäväksi suhteellisen kosteuden tasapainotilan saavuttamiseen. Seuraavaksi toiseen astioista asetettiin 20,0 g silikonista alumiiniastiassa (kuva 4.27). Tämän jälkeen suhteellisen kosteuden muutosta astioissa seurattiin.



**Kuva 4.26** Silikonikoejärjestely

Toinen koesarja tehtiin hyödyntämällä koekappaleiden keskimmäisiä (75 mm) mittaputkia. Kaikkien kappaleiden keskimmäisiin mittaputkiin (8 kpl) asennettiin ensin sinitaralla tiivistetty anturi. Antureiden tasaannuttua riittävästi, vaihdettiin puoliin antureista (4 kpl) sinitarran tilalle silikonin.



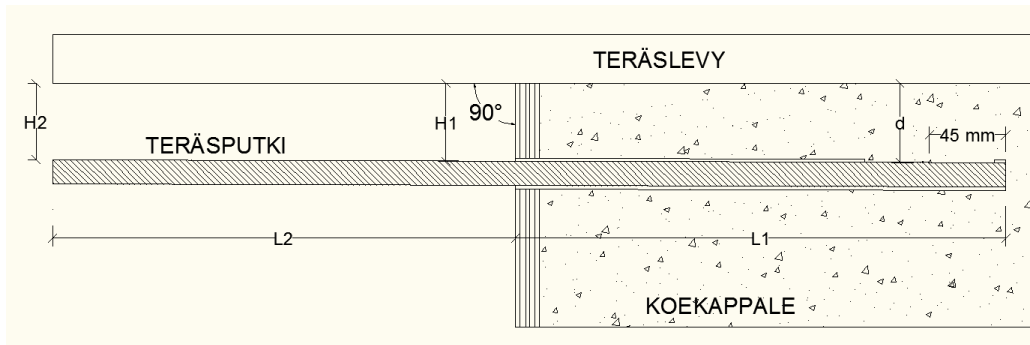
**Kuva 4.27** Tutkimuksessa anturien tiivistämiseen käytetty silikonin

### 4.5.3 Mittaputkien syvyyden tarkistus

Valussa esiintyneiden mahdollisten häiriöiden vuoksi kapasitiivisia kosteusantureita varten koekappaleisiin sijoitettujen mittaputkien syvyys haluttiin tarkistaa. Tarkistus suoritettiin koejärjestelmän ollessa vielä käynnissä. Koska koekappaleita ei haluttu tässä vaiheessa häiritä, tehtiin mittaus epäsuorasti mittaputkia hyödyntäen (kuva 4.28).



Mittaus suoritettiin mittaamalla mittaputkeen asetetun teräsputken etäisyys koekappaleen sivuun kiinnitettyyn metalliseen levyyn kahdessa pisteessä (kuva 4.29). Näiden kahden mittapisteen avulla saatiin laskettua mittaputken vinous. Koska mittaputken pituus koekappaleessa ja sen ulkopuolella oli tiedossa, voitiin kunkin putken todellinen mittaussyvyys laskea.

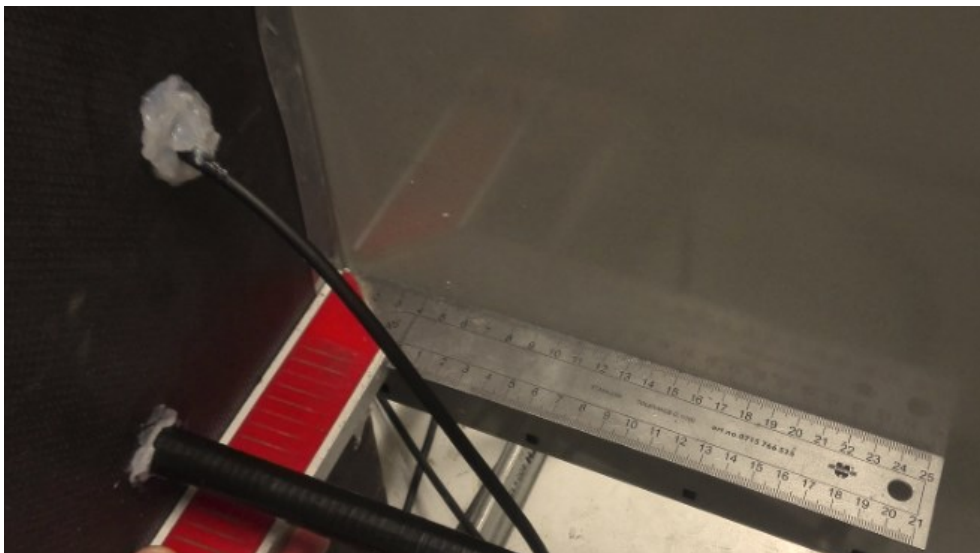


**Kuva 4.28** Mittaputken syvyyden tarkistuksen periaatekuva

Mittaputken todellinen mittaussyvyys  $d$  (mm) laskettiin kaavalla (kaava 4.1):

$$d = H1 + \frac{L2}{H1 - H2} \cdot (L1 + L2 - 45\text{mm}), \quad (4.1)$$

jossa  $L1$ ,  $L2$ ,  $H1$ ,  $H2$  ovat kuvassa 4.28 esitetyt termit millimetreinä.



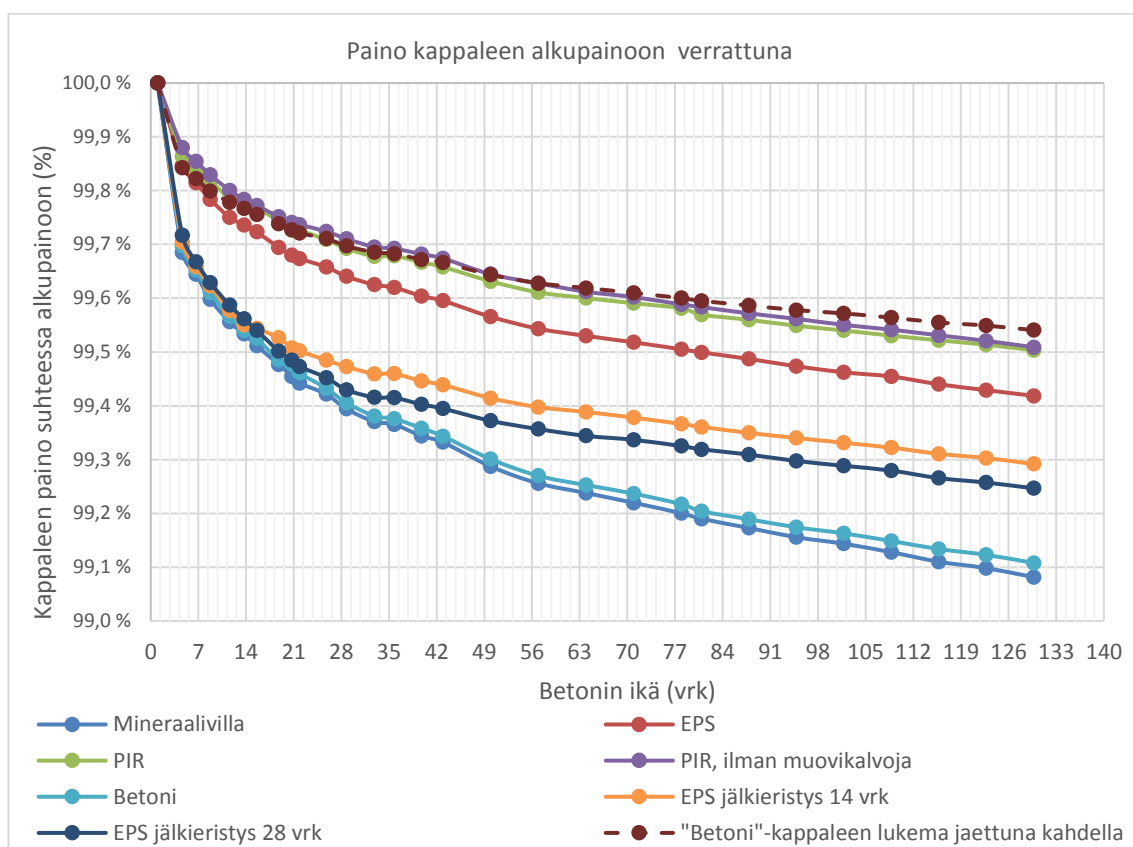
**Kuva 4.29** Metallilevyn suoruus koekappaleeseen nähden tarkistettiin suorakulmalla

Mittausten perusteella havaittiin, että suurin osa mittausputkista oli tarkkuudessa  $\pm 3$  mm tavoitesyvyydestä, mutta myös tätä suurempia virheitä havaittiin. Mittaputkien siirtymien valuvaiheessa on voinut johtua esimerkiksi sauvatäryttimen osumisesta mittausputkeen. Kunkin mittaputken todelliset mittaussyvyyydet on ilmoitettu kapasitiivisten kosteusantureiden tulossiosissa.

## 5. TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

### 5.1 Punnitus

Kuvassa 5.1 on esitetty lieriökoekappaleiden punnitustulokset kunkin eristelaadun koekappaleista luodun koekappaleryhmän punnitustulosten keskiarvona. Kussakin ryhmässä oli 3 koekappaletta. Kaavioon on lisäksi lisätty ”Betoni-kappaleen lukema jaettuna kahdella” kuvaamaan teoreettisesti toiselta kuivumispuolelta täysin suljettua kappaletta.



**Kuva 5.1** Punnituskoekappaleiden painonmuutos suhteessa alkupainoon

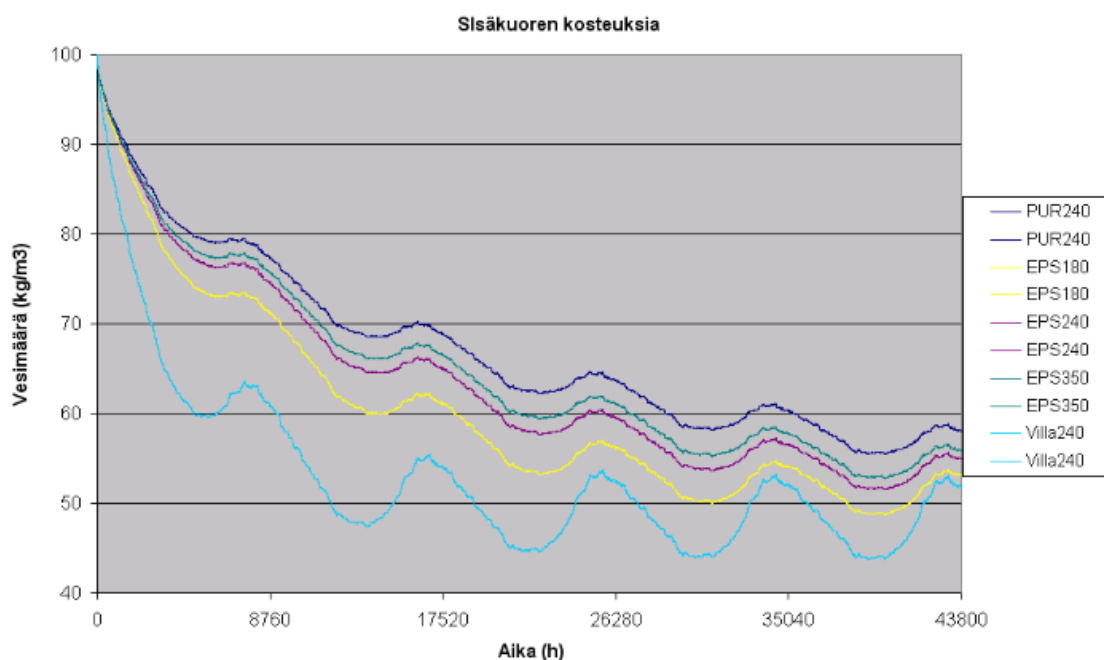
Punnituskoekappaleet noudattivat teorian mukaista kuivumismallia kohtuullisesti. Kaikki kappaleet kuivuivat alkuvaiheessa melko nopeasti ja ajan kuluessa kuivuminen hidastui.

Punnituskoekappaleiden perusteella mineraalivillalla eristetty kappale ja eristämätön betonikuori kuivuvat hyvin samalla tavalla koko tarkastelujakson ajan. Tämä viittaa siihen, että mineraalivilla läpäisee vesihöyryä hyvin. Myös kaikki alkuvaiheessa eristämättömät kappaleet (jälkieristetyt ja betonikuori) kuivuivat samalla tavalla toisiinsa nähden aina eristyshetkeen saakka.

Betonielementtien jälkieristäminen EPS-eristeellä hidasti kuivumista eristeen suuntaan selkeästi. Jälkieristetyt kappaleet alkoivat eristyshetkestä lähtien kuivua samalla tavalla, kuin valuhetkellä EPS-eristetyt kappaleet.

PIR-eristetyt kappaleet kuivuivat punnituskokeen perusteella hitaimmin. PIR-eristettyjen kappaleiden kuivumisnopeus on hyvin lähellä betonikappaleesta keinotekoisesti luodun puolitetun kuivumisen kuvaajaan. Sen perusteella voidaan arvioida, että PIR-eriste vaikuttaa estävän kuivumisen tapahtumisen toiseen suuntaan lähes kokonaan. PIR-eristeessä olevalla muovikalvolla ei vaikuta olevan suurta merkitystä kappaleen kuivumiseen.

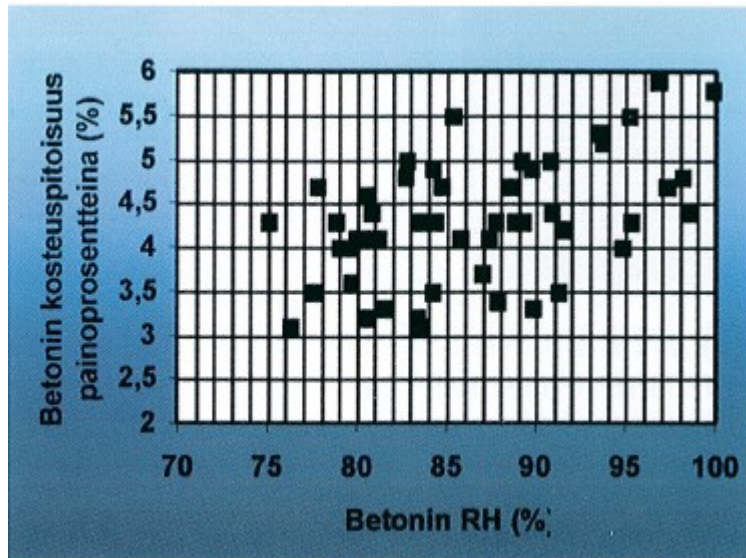
Kirjallisuudessa (Ormiskangas 2009) on laskennallisesti määritetty sisäkuoren kosteuksia eri eristeitä käytettäessä. Mineraalivillan ja solumuovieristeiden välinen ero sisäkuoren kuivumiseen on havaittu aiemmin suureksi (kuva 5.2). Myös tämän tutkimuksen punnitustuloksissa mineraalivillalla eristetyistä kappaleesta haihtui koko tarkastelujaksolla huomattavasti enemmän vettä kuin solumuovieristetyillä kappaleilla.



**Kuva 5.2** Laskennallisesti määritettyjä sisäkuoren suhteellisia kosteuksia eri lämmöneristeitä käytettäessä (Ormiskangas 2009)

Punnituskoekappaleita ei punnittu välittömästi valun jälkeen, koska koekappaleiden suojelemiseksi tuli odottaa valun kovettumista. Näin ollen ensimmäisen vuorokauden aikana poistunutta vesimäärää ei ole tiedossa. Käytössä olleen punnitusmenettelyn perusteella ei voida arvioida kemiallisesti sitoutuneen veden määrää. Sen selvittämistä varten kappaleet tulisi lämpökuivata kokonaan ja verrata betonireseptissä olleen vesimäärän suhdetta tulokseen.

Koejärjestelmänä käytetyn punnituskokeen heikkous on se, että koekappaleen sisäisestä kosteusjakaumasta se ei kerro tarkasti mitään. Koekappaleesta tietyltä syvyydeltä otettavan punnitusnäytteen ottaminen voisi kertoa enemmän. Toisaalta kirjallisuuslähteen (Merikallio 2002) perusteella betonin kosteuspitoisuuden ja suhteellisen kosteuden yhteys (kuva 5.3) on riippuvainen hyvin monesta asiasta, joten koekappaleen sisältävän vesimäärän muuttaminen tarkaksi suhteellisen kosteuden lukemaksi on erittäin vaikeaa.



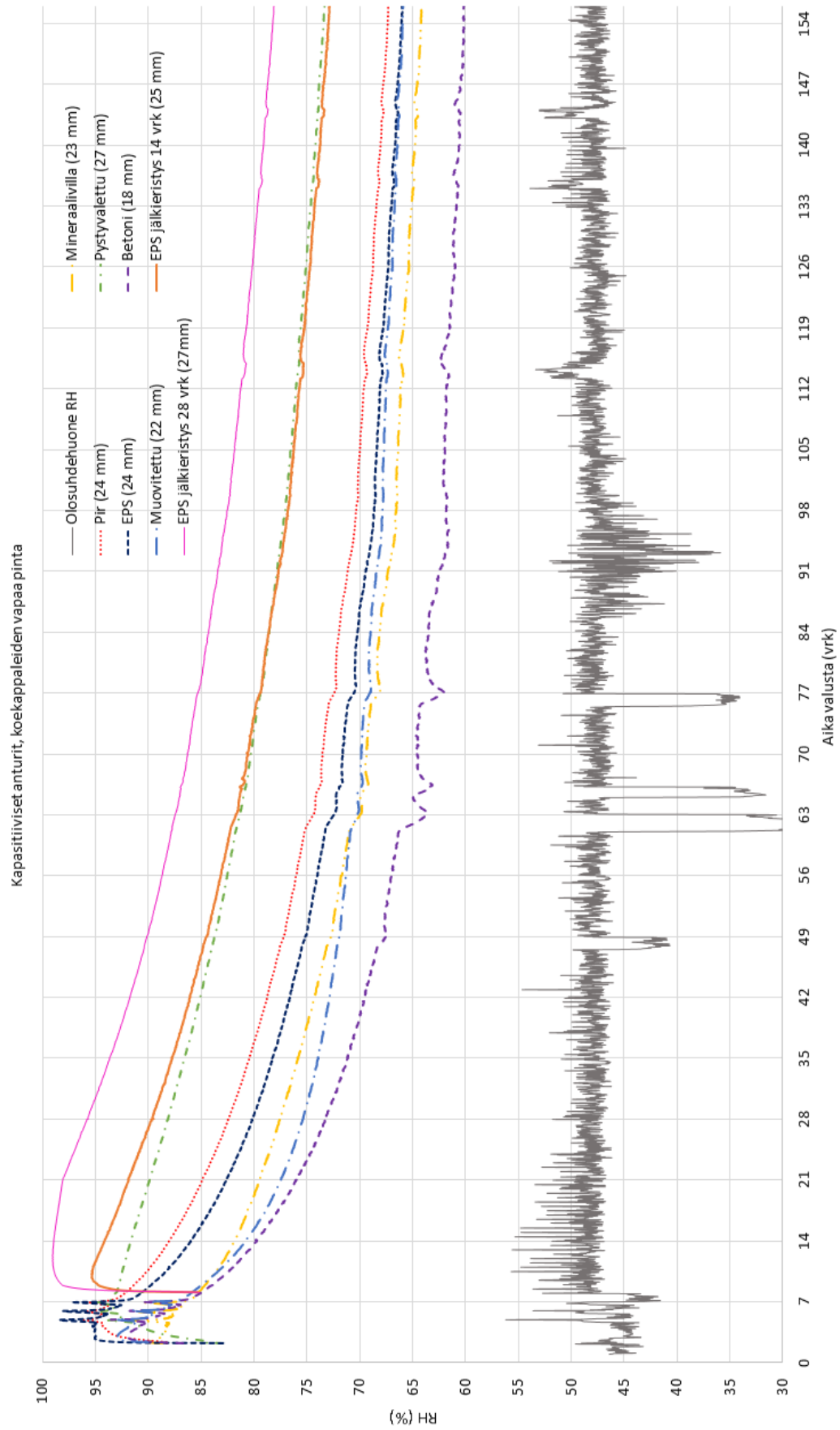
**Kuva 5.3** Betonin kosteuspitoisuuden ja suhteellisen kosteuden yhteys (Merikallio 2002)

Kaikki tekijät huomioon ottaen punnituskokeita voidaan pitää onnistuneena. Ne osoittavat melko selkeästi eri eristelaatujen vaikutuksen betonisisäkuoren kuivumiseen.

## 5.2 RH/T-anturit

### 5.2.1 Kapasitiiviset kosteusanturit

Koekappaleiden pintaosien mittaputkissa olleiden kapasitiivisten RH/T-antureiden tuloksista muodostetut kuvaajat on esitetty kuvassa 5.4. Mittaustuloksia tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon eri antureiden väliset erot kalibrointituloksissa (Liite B) ja antureiden toisistaan poikkeavat mittaussyvyydet. Syvemmällä koekappaleissa olleiden kosteusantureiden mittaustulokset on esitetty tutkimuksen liitteenä (Liite C), mutta kyseisiin mittaustuloksiin liittyy suurta epävarmuutta (kappale 5.2.4).



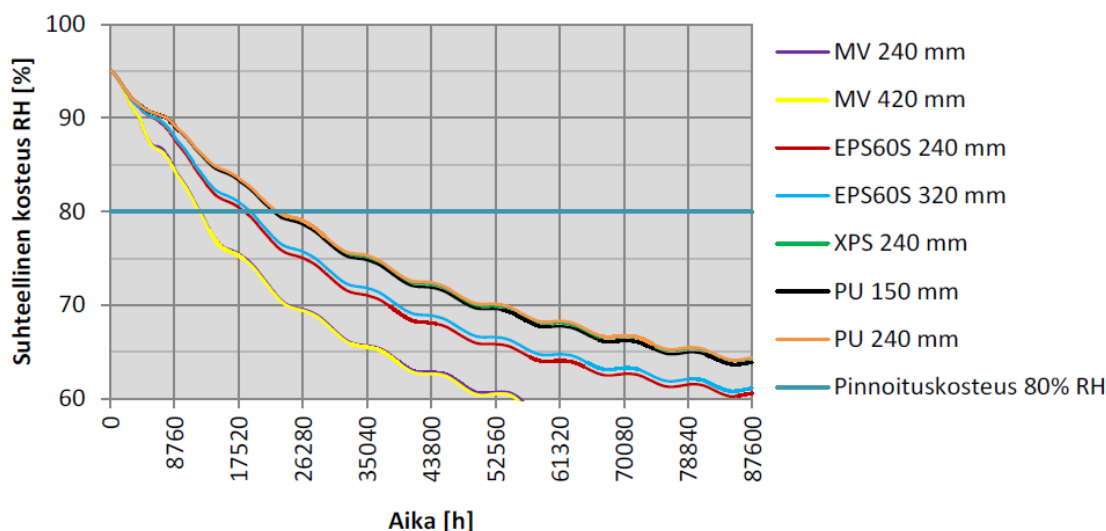
**Kuva 5.4** Kapasiitiivisten kosteusantureiden mittaustulokset

Betonin alkukosteuspitoisuuden havaitaan olevan välillä 90...95 % RH, mikä on kirjallisuuslähteen (Merikallio 2002) mukaisestikin mahdollista. Kuivuminen on alkuvaiheessa nopeaa ja hidastuu jatkuvasti.

Betonielementin pintaosassa ensimmäisenä 75 % tavoitekosteuden saavutti eristämätön betonikappale (24 vrk valusta) ja seuraavaksi muovitettu eristämätön betoni kappale (30 vrk). Tuloksista havaitaan selkeästi myös valussa paremmin tiivistettyjen pintojen vaikutus kuivumiseen. Muottia vasten valussa olleiden pintojen (pystyvalettu ja jälkieristetyt koekappaleet) kuivuminen suhteelliseen kosteuteen 75 % RH kesti huomattavan pitkään, noin 150 vrk. Muottia vasten valettaessa kuivumisajan pidennys johtui todennäköisesti huokosverkon voimakkaasta tiivistymisestä hydrataation vaikutuksesta. Tästä syystä EPS-jälkieristettyjen kappaleiden kosteusmittaustulokset ovat koko mittausajanjakson korkeampia kuin jo valussa EPS-eristetyn koekappaleen.

Koekappaleiden pinta-osien kuivuminen vaikuttaa tutkituilla eristemateriaaleilla melko samankaltaiselta. On todennäköistä, että arviointisyvyydellä (30...60 mm) erot olisivat olleet suuremmat eri eristelaatujen välillä. Pintaosien kuivumiskuvaaajista on havaittavissa, että mitä suurempi on eristeen vesihöyrynvastus, sitä hitaampaa on betonipinnan kuivuminen myös eristämättömään pintaan. Pintaosien kuivumistuloksiin on kuitenkin vaikuttanut myös se, kuinka syvällä betonin pinnasta mittaputki on todellisuudessa ollut. Mitä lähempää betonin vapaata pintaa mittaus suoritetaan, sitä enemmän eri rakennetyyppien mittaustulokset vastaavat toisiaan. Tuloksia tulkittaessa on otettava huomioon, että putkien syvyys sijainti ei ole kaikissa mittaputkissa sama koejärjestelmän valuvaiheessa tapahtuneiden siirtymien seurauksena.

Kirjallisuudessa (Vinha et al. 2013) suhteellinen kosteus betoniseinässä on havaittu arviointisyvyydellä A merkittävästi erilaiseksi eristelaadusta riippuen (kuva 5.5). Tässä tutkimuksessa yhtä vahvaa yhteyttä ei havaittu. On kuitenkin huomattava, että mineraalivilalla eristetyn betonikappaleen kahteen suuntaan tapahtuva kuivuminen mahdollistaa käytettäväksi arviointisyvyyttä 0,2 d. Tällöin pinnoitettavuudelle määritetty raja-arvo saavutetaan huomattavasti nopeammin kuin yhteen suuntaan kuivuvalla kappaleella.



**Kuva 5.5** Rakennusaikaisen kosteuden poistuminen 150 mm betonikuoresta eri eristeitä käytettäessä syvyydellä 0,4 d (Vinha et al. 2013)

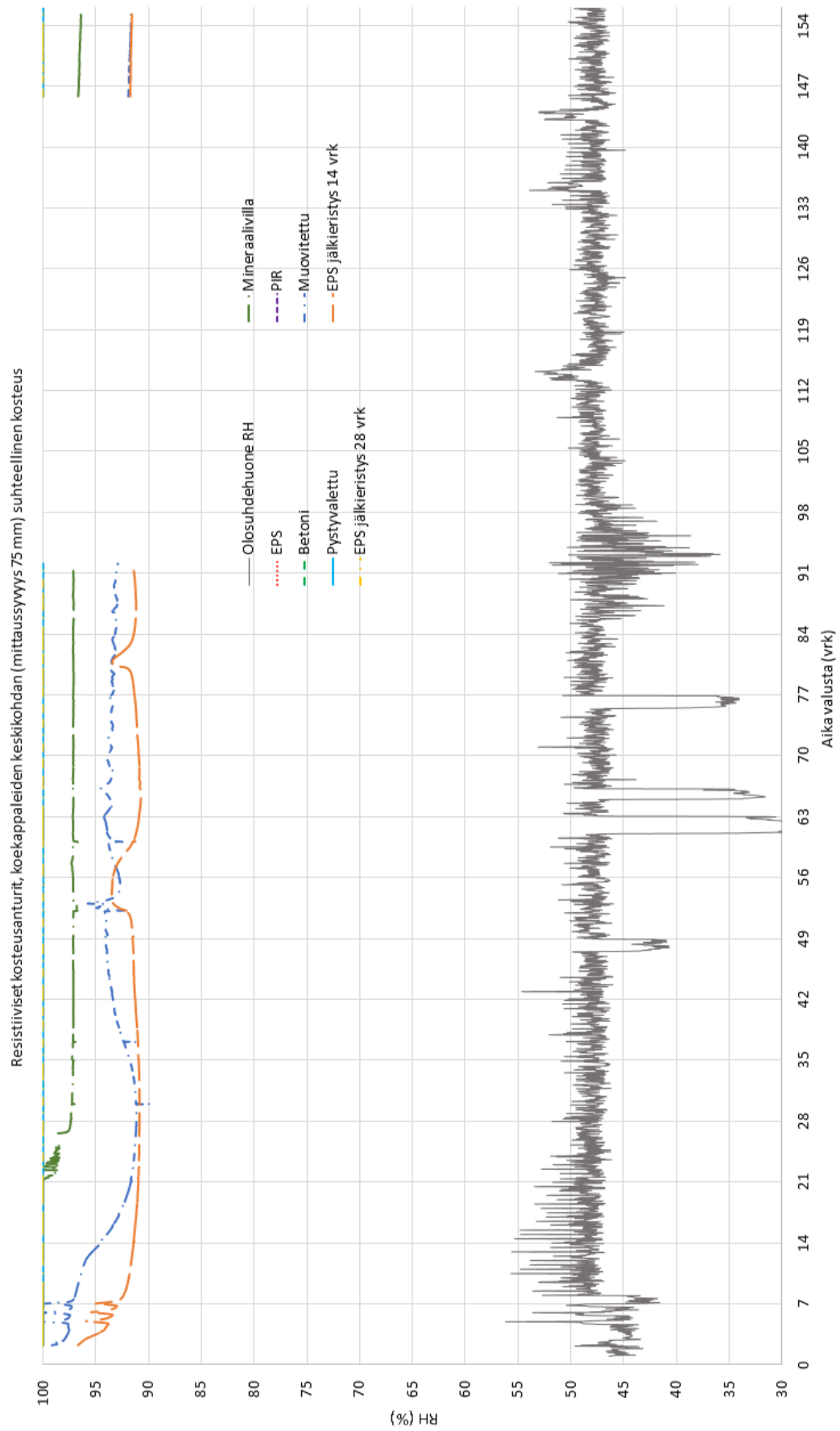
Vaikka kuivuminen tapahtui koekappaleiden pinta-osissa melko samankaltaisesti, täytyy ero eristeiden kosteusteknisissä ominaisuuksissa ottaa huomioon pinnoituspäätöstä tehtäessä. Solumuovieristeillä (etenkin PIR-eristeellä) eristettyjen kappaleiden pinnoittaminen huonosti vesihöyryä läpäisevällä pinnoitteella johtaa rakenteen kuivumisen pysähtymiseen.

## 5.2.2 Resistiiviset valuanturit

Resistiivisten valuantureiden tulokset on esitetty tutkimuksen kuvassa 5.6. Mittaustulosten perusteella koekappaleiden keskiosan kuivumisessa ei ole suurta eroa keskenään. Betonielementtien keskiosa kuivuu resistiivisten anturien perusteella erittäin hitaasti, ja on koko mittausaikajakson kaikilla kappaleilla lukemissa 90...100 % RH.

Resistiivisten anturien lukemissa havaitaan jaksottaisia nousuja ja laskuja, jotka liittynevät kyseisten anturien mittaussysteemin ominaisuuksiin, eivätkä ole todellisia koekappaleissa tapahtuneita kosteusmuutoksia. Valuanturien tuloksia ei voida pitää erityisen luotettavina, sillä ne poikkeavat hyvin paljon sekä kapasitiivisten anturien mittaustuloksista että porareikämittaustuloksista.

Resistiivisten valuanturien mittaustuloksia katosi tutkimuksen keskivaiheilta loggerin nollattua muistinsa. Kadonneesta tiedosta ei kuitenkaan koitunut suurta menetystä, sillä lukemat tallentumattoman jakson molemmiin puolin ovat hyvin samankaltaisia.



**Kuva 5.6** Resistiivisten kosteusantureiden mittaustulokset



### 5.2.3 Porareikämittaukset

Porareikämittaukset suoritettiin  $200 \pm 1$  vuorokauden kuluttua valusta kaikille koekappaleille kaikissa eri tavoitemittaussyvyyksissä. Porareikämittausten tulokset on koottu taulukkoon 5.1:

*Taulukko 5.1 Porareikämittausten mittaustulokset*

Koekappale	Suhteellinen kosteus (% RH)		
	25 mm	75 mm	125 mm
Mineraalivilla	67	79	79
PIR	67	81	84
EPS	66	79	82
EPS, jälkieristys 14 vrk	71	82	82
EPS, jälkieristys 28 vrk	71	81	80
Betoni	67	79	74
Betoni, pystyvalettu	70	80	73
Betoni, muovitettu	70	80	71
Keskiarvo	69	80	78

Porareikämittausten perusteella koekappaleiden suhteelliset kosteudet ovat hyvin samankaltaisia keskenään etenkin kappaleiden vapaissa pinta-osissa. Valusta asti vapaina olleiden pintojen suhteellisen kosteuden mittaustulosten keskiarvo 25 mm mittaussyvyydellä on 66,6 % RH (suurin poikkeama 1,1 % RH). Valussa muottia vasten valettujen pintojen keskiarvo oli 72,1 % RH ja valutilanteessa ainoan muovitetun pinnan lukema oli 69,9 % RH. Näin ollen voidaan havaita valutilanteen ensimmäisen vuorokauden käsittelyllä olevan vaikutusta koekappaleen kuivumiseen vielä pitkän ajan kuluttua valutilanteesta.

Eristettyjen koekappaleiden eristepinnalta (mittaussyvyys 125 mm) tehtyjen mittausten keskiarvo oli 81,3 % RH. Suurin kosteuskokema (83,7 % RH) mitattiin PIR-eristetyistä kappaleista ja pienin kosteuskokema (78,8 % RH) saatiin mineraalivillalla eristetyistä kappaleista. Vaikka mitatut lukemat ovat mittavirheen ( $\pm 5$  % RH) sisällä, on oletettavaa että kosteuspitoisuus tiiviin eristeen päällä on suurempi kuin mineraalivillaeristeen vastavassa mittauspisteessä.

Mineraalivillapinnassa koekappaleen kosteuskokema 78,8 % RH vaikuttaa suurelta siihen nähden, että punnitustulosten perusteella mineraalivillan ei tulisi juurikaan hidastaa kappaleen kuivumista villapintaan päin. On mahdollista, että kyseisen koekappaleen villa on painunut, jolloin mittaussyvyys 125 mm ei ole yhtä lähellä eristepintaa kuin muissa eristetyissä kappaleissa. Mineraalivillan painuman tarkkaa arvoa ei tutkimuksessa selvitetty.

Porareikämittaukset tehtiin vain yksittäisinä mittauksina koekappaleiden rajatun koon vuoksi. Vaikka laboratorio-olosuhteissa tehtyä mittausta voidaan pitää tarkkana, yksittäisen mittauksen mahdollista virhettä ei saada selville vertailumittausten puutteen vuoksi.

Porareikämittaustulokset kokonaisuudessaan kertovat kuitenkin siitä, että erot koekappaleiden kuivumisessa pitkän ajan kuluttua valusta eivät ole kovin suuria. Suurimmat erot porareikämittauksissakin havaitaan siinä, kuinka syvältä betonista mittausta suoritetaan. Tutkimustulosten perusteella betonin diffuusiovastus voidaan arvioida niin suureksi, että betoni itsessään on kuivumista eniten rajoittava tekijä.

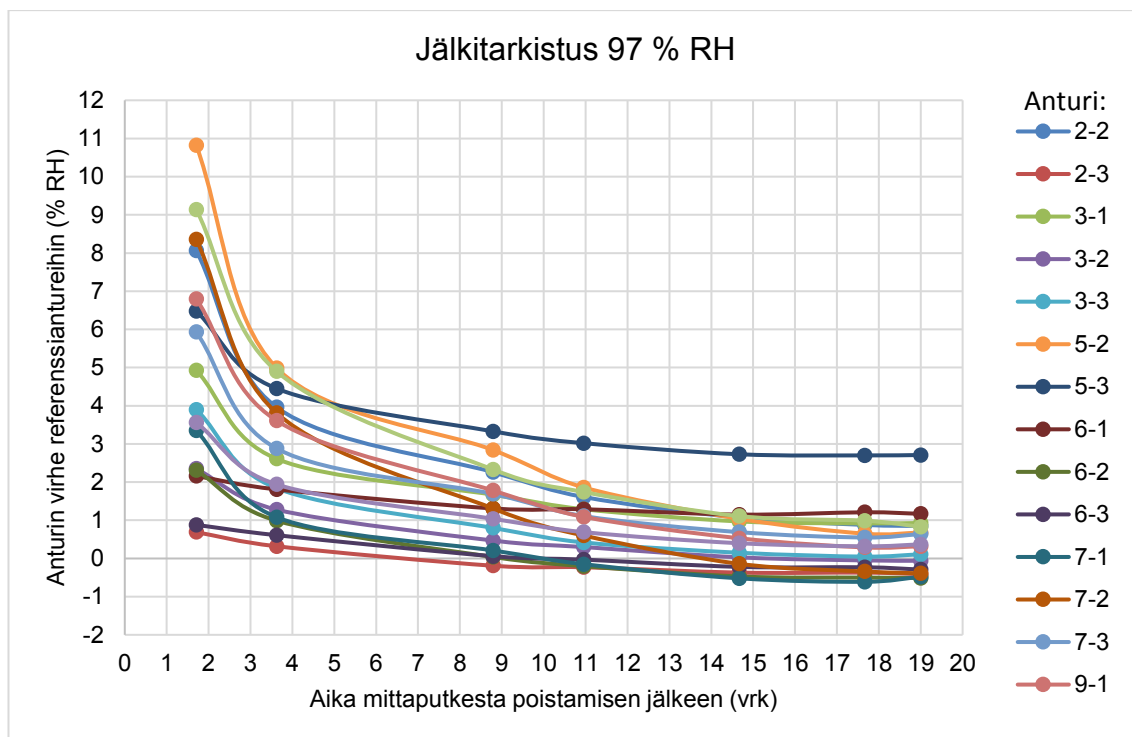
Vaikka tiiviiden eristeiden eristepinnassa kosteuspitoisuus jää suuremmaksi kuin mineraalivillaa käytettäessä, ei se suoraan tarkoita rakenteelle vauriota tai ongelmia rakennuksen sisäilmassa. Mikäli tiiviin eristekerroksen ja betonin väliin ei jää orgaanista ainetta, ei korkeissakaan suhteellisissa kosteuksissa välttämättä synny merkittävää homekasvua (Viitanen 2004).

#### **5.2.4 Kapasitiivisten kosteusantureiden lopputarkistus**

Kapasitiiviset kosteusanturit tarkistettiin koejärjestelmän lopuksi neljässä eri suolaliuoksessa. Anturien näyttämää lukemaa verrattiin referenssiantureina käytettyihin antureihin.

Koekappaleiden pinta-osissa olleet anturit näyttivät referenssianturien lukemiin verrattuna pääosin  $\pm 3$  % RH, eli anturit eivät olleet merkittävästi vaurioituneet tutkimuksen aikana. Kun tutkimukseen hyväksyttiin anturit, joiden virhe referenssiantureihin nähden oli  $\pm 3$  % RH, voidaan näiden anturien arvioida selviytyneen tutkimuksesta hyvin. Kunkin käytetyn anturin virhe kussakin suolaliuoksessa on koottu liitteeseen B.

Syvemmillä kappaleissa olleet anturit sen sijaan näyttivät pääosin merkittävästi referenssiantureista poikkeavia mittaustuloksia (kuvat 5.7 ja 5.8), etenkin korkeissa ( $> 80$  % RH) suhteellisissa kosteuksissa. Tästä syystä pinta-osia syvemmillä koekappaleissa olleiden antureiden (16 kpl) käyttäytymistä kokeen jälkeen seurattiin tarkemmin.

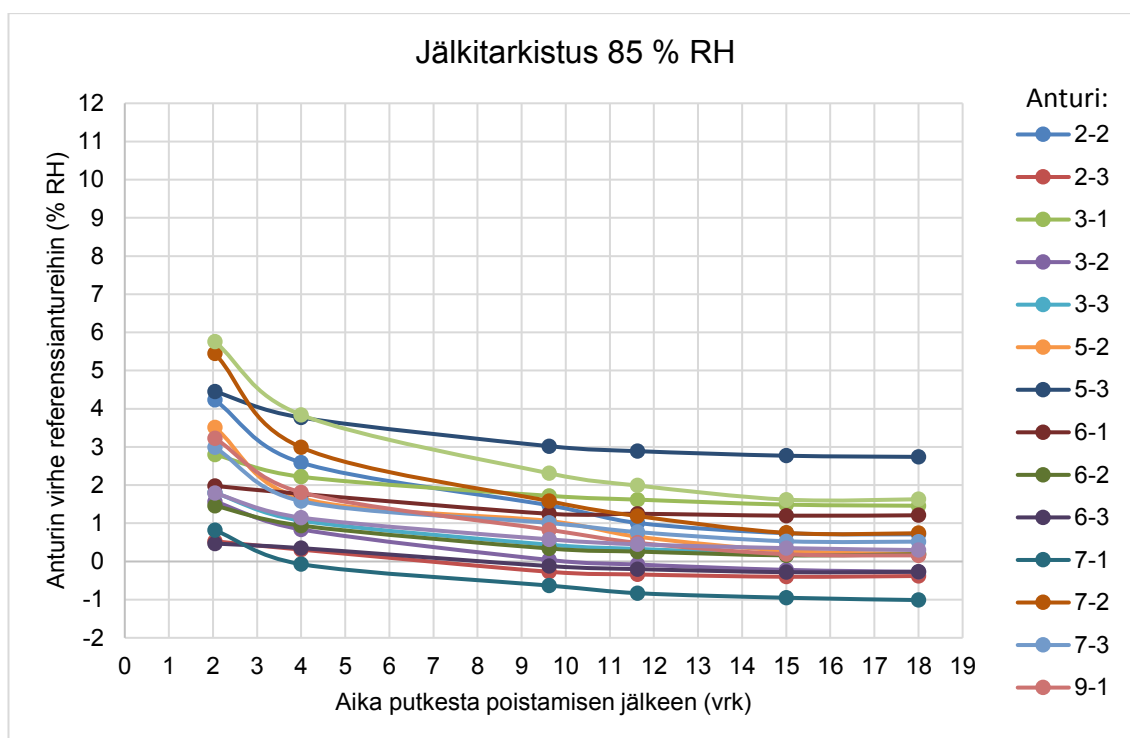


**Kuva 5.7** Syvällä koekappaleissa olleiden antureiden jälkitarkistustuloksia

Ensimmäinen tasaantunut mittaustulos saavutettiin 41 tunnin kuluttua antureiden poistamisesta mittaputkista. Ensimmäisellä jälkitarkistuskierroksella anturien mittavirheiden itseisarvojen keskiarvo oli 4,99 % RH, kun mittaus suoritettiin 97 % RH:ssa. Ensimmäisessä kalibroinnissa havaittiin jopa lähes 11 % RH ero mitta-anturin ja referenssianturin välillä. Kaikki syvällä olleet anturit näyttivät referenssiantureihin nähden liian suuria mittaustuloksia.

Ensimmäisellä jälkitarkistuskierroksella anturien mittavirheiden itseisarvojen keskiarvo oli 2,68 % RH, kun mittaus suoritettiin 85 % RH:ssa (kuva 5.8). Vaikka keskiarvollinen virhelukema on koejärjestelylle määritetyn mittavirheen puitteissa, esiintyi anturijoukossa paljon myös tuota lukemaa suurempia mittavirheitä.

Anturien mittavirhe referenssiantureiden nähden havaittiin pienenevän ajan kuluessa. Noin kymmenen vuorokauden kuluttua mittavirhetulosten itseisarvojen keskiarvo oli 97 % RH:ssa enää 0,97 % RH ja 85 % RH:ssa 0,89 % RH. Tämä tutkimustulos osoittaa sen, että anturien jälkitarkistus on tehtävä mahdollisimman nopeasti anturien tutkimuskäytön jälkeen, jotta mahdolliset virheet anturien lukemissa saadaan selville. Toisaalta tutkimustulos vahvistaa sen, että vaikka anturit tarkistetaan huolellisesti ennen koejärjestelyä, ei antureiden lukema välttämättä pidä paikkaansa itse mittaustilanteessa.



**Kuva 5.8** Syvällä koekappaleissa olleiden antureiden jälkitarkistustuloksia

Pienemmissä suhteellisissa kosteuksissa tehdyissä tarkistuksissa antureissa ei havaittu yhtä suuria virheitä. Referenssikosteuden mittauspisteessä 59 % RH mittavirheiden itseisarvojen keskiarvo oli ensimmäisellä kalibrointikierröksellä 1,02 % RH ja 33 % RH referenssipisteessä mittavirhe oli keskimäärin 0,63 % RH. Seuraavilla kalibrointikierröksillä virhelukemat eivät näissä tarkistuskosteuksissa juurikaan muuttuneet. Mittausvirhe ja virheen palautuminen vaikuttaa tulosten perusteella olevan sidoksissa tarkistuspisteen suhteellisen kosteuden arvoon ja palautumisaikaan.

Koekappaleiden pinta-osien anturien ja syvemmällä kappaleissa olleiden anturien käyttäytyminen jälkikalibroinneissa poikkesi toisistaan. Syvemmällä koekappaleissa olleet anturit joutuvat kärsimään pinta-antureita suuremmasta kosteusrasituksesta. Kuitenkaan kalibrointiastioissa tehdyissä tarkastuksissa antureissa ei ole havaittu samanlaista käyttäytymistä, vaikka niissäkin käytössä on korkeat suhteelliset kosteudet. Tästä syystä anturien yhdistetty betonipöly- ja kosteusrasitus lieenee antureita sekoittava tekijä, sillä kumpaakaan tekijää yksinään ei voida osoittaa syylliseksi.

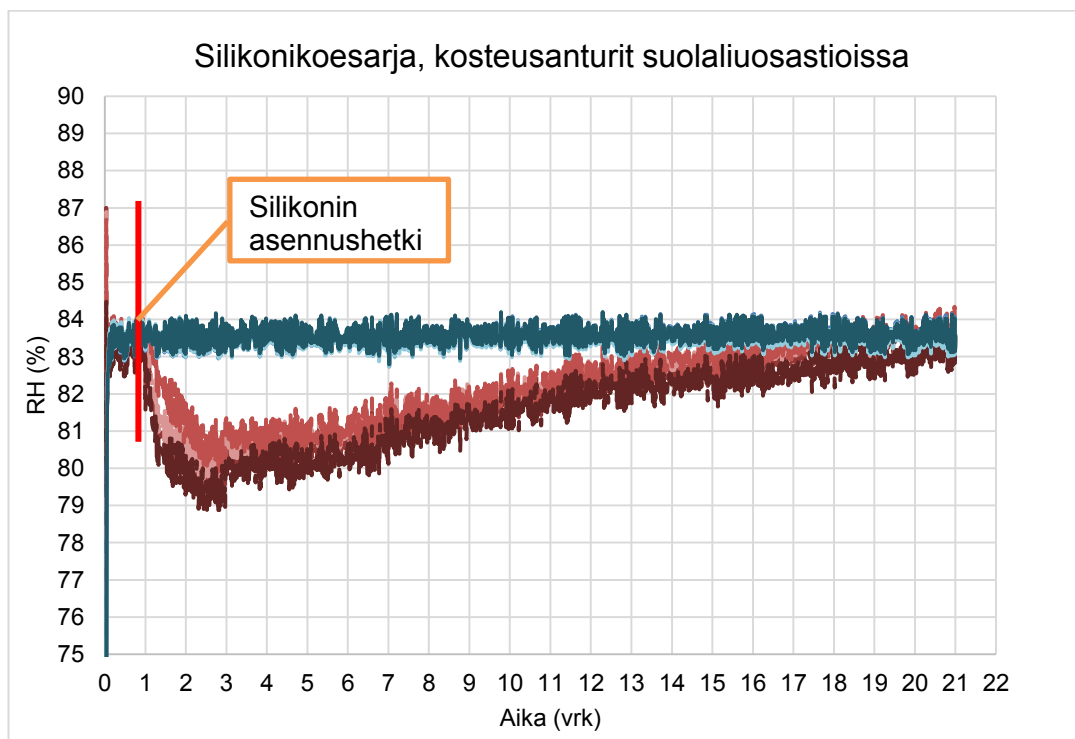
Betonin suhteellisen kosteuden mittausohjeessa (Rakennustieto 2010) on lueteltu useita mittauksen epävarmuustekijöitä. Mittapään reiässäoloajan ei kuitenkaan ohjeen mukaan tulisi nostaa anturin ilmoittamaa lukemaa yli todellisen kosteuden arvon. Lisäksi mittapään käytön ja käyttökohteen epävarmuustekijä voi ohjeen mukaan laskea tai nostaa kosteuskokemaa 5 % RH. Tässä tutkimuksessa havaittiin huomattavasti ohjetta suurempia epävarmuuksia.

Anturien mittavirheen muuttuminen ajan ja suhteellisen kosteuden suhteen on kyseisten anturien mittaustulosten kannalta erittäin merkittävä asia, sillä mittavirheen suuruutta itse koejärjestelyn aikana ei voi todellisuudessa tietää. Vaikka antureiden alkuperäinen kalibrointi tehdään onnistuneesti, voi anturin todellinen virhe jäädä huomaamatta, mikäli jälkitarkastus tehdään liian myöhään.

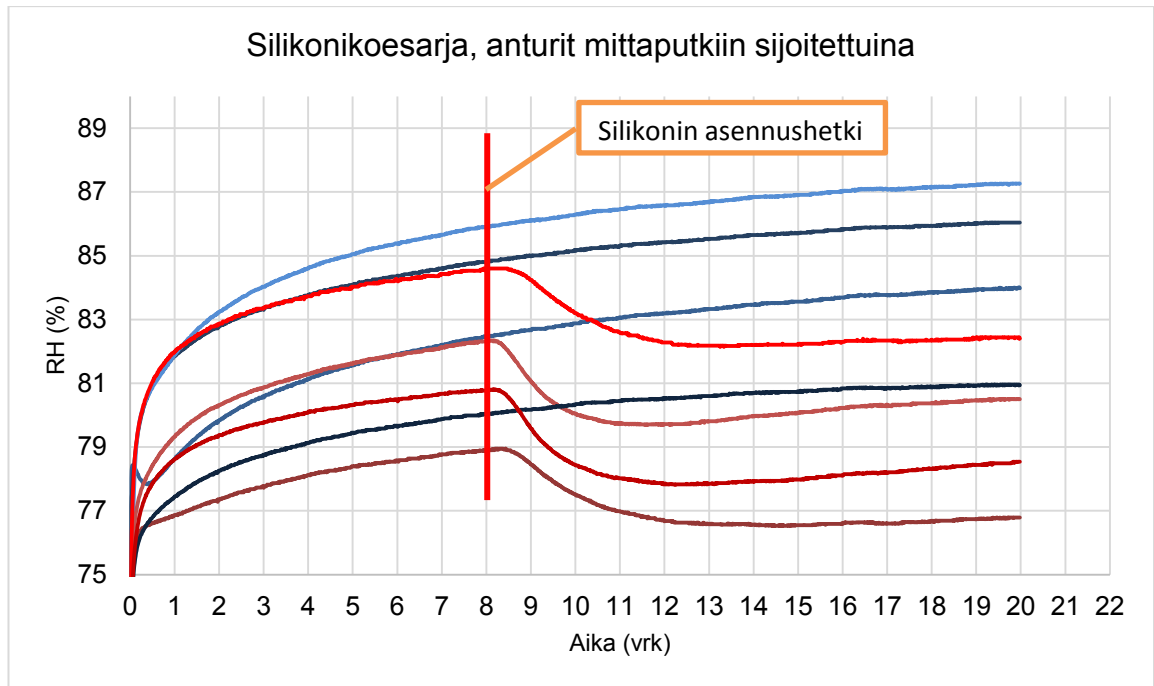
### 5.2.5 Silikonin vaikutus kapasitiivisiin kosteusantureihin

Tutkimuksessa käytetyllä silikonilla havaittiin olevan suhteellista kosteutta laskeva vaikutus sekä mittaputkessa että muoviasiassa (kuvat 5.9 ja 5.10). Silikonin vaikutus mittaustulokseen mittaputkessa oli maksimissaan -3,00 % RH ja neljän eri anturin maksimin ja minimin erotuksen keskiarvo oli -2,63 % RH.

Muoviasiassa silikonin vaikutus anturin mittalukemaan oli maksimissaan -5,07 % RH ja neljän eri anturin maksimin ja minimin erotuksen keskiarvo oli -4,76 % RH. Toisaalta vertailuastiassakin olleissa antureissa tapahtui tasaantumisen jälkeenkin suhteellisen kosteuden jaksoittaista heittelyä, jolloin joukon maksimi- ja minimiarvojen välille tulee luontaista kasvua. Vertailuastian kaikkien antureiden maksimien ja minimien erotusten keskiarvo oli 1,41 % RH. Mikäli vertailuastian lukema 1,41 % RH vähennetään kyseisistä maksimien ja minimien erotuksesta, on silikonin vaikutus melko lähellä toisiaan sekä mittaputkessa että muoviasiassa.



**Kuva 5.9** Silikonin vaikutus muovastian suhteelliseen kosteuteen, punertavat värit: anturi silikoniastiassa, sinertävät värit: anturi astiassa jossa ei ole silikonaa



**Kuva 5.10** Silikonin vaikutus anturin lukemaan mittaputkessa, punertavat värit: anturi tiivistetty silikonilla, sinertävät värit: anturi tiivistetty sinitarralla

Silikonin suhteellista kosteutta laskeva vaikutus oli huipussaan n. 2-3 vuorokauden kulluttua silikonin asennuksesta. Mittaputkeen sijoitettujen anturien suhteellinen kosteus ei ehtinyt palata normaaliksi koejärjestelyn aikana, mutta muoviastiassa olleiden anturien lukuarvot palasivat normaaleiksi n. 20 vuorokauden kulluttua silikonin asettamisesta astiaan. Tähän ilmiöön voi olla syynä se, että tuore silikonin emittoi yhdisteitä jotka vaikuttavat suhteellisen kosteuden mittausravoon. Silikonin kovettumisreaktio saattaa myös sitoa ympäröivästä ilmasta kosteutta, joka laskee ilmatilan suhteellista kosteutta.

Tutkimuksessa käytetty silikonin voi olla yksi osasy anturien hitaaseen tasoittumiseen putkessa, mutta antureiden tasaantuminen putkeen havaittiin hitaaksi myös sinitarratiivistystä käytettäessä. Silikonikoesarjan perusteella ei voida sanoa silikonin olleen kosteusantureita sekoittava tekijä.

### 5.2.6 RH/T-anturien yhteenveto

RH/T-anturien tulosten vertaileminen on tämän tutkimuksen aineiston perusteella haastavaa, sillä koejärjestelyssä ei saatu riittävän hyvin vertailukelpoista dataa. Haasteita tulokintaan aiheutti eri antureiden toisistaan merkittävästi poikenneet mittaustulokset ja mittaputkien syvyyden epätarkkuudet.

Vertailtaessa mittaputkeen sijoitettuja antureita ja porareikämittaustuloksia, voidaan pinta-osien kosteusantureiden lukemia pitää melko luotettavina. Kun valitaan  $25 \pm 3$  mm syvyydessä olleiden mittaputkien lukemat, saadaan mittausten keskimääräiseksi erotukseksi porareikämittausten vastaaviin lukemiin 3,1 % RH. Myöskään kapasitiivisten

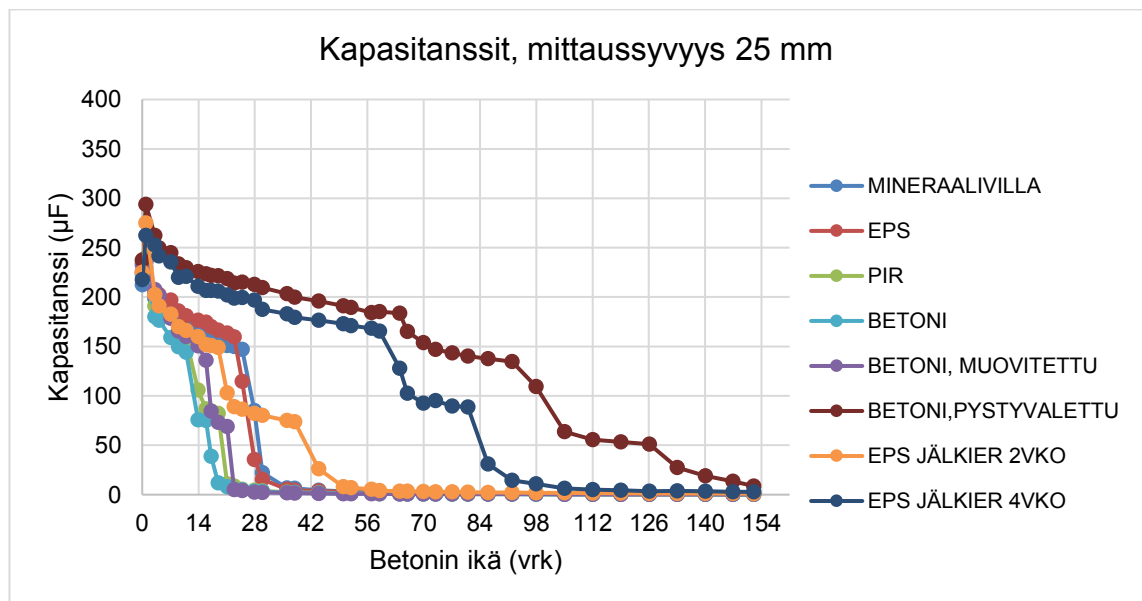
anturien lopputarkistuksen perusteella koekappaleiden pintaosiin sijoitetut anturit eivät koejärjestelmän aikana kontaminoituneet.

Syvemmillä koekappaleissa mittaustulokset poikkeavat toisistaan erittäin paljon eri anturityyppien välillä. Epätarkimmillaan porareikämittauksen mittaustulokseen (81,1 % RH) verrattut lukemat olivat kapasitiivisella kosteusanturilla 95,7 % RH ja resistiivisellä valuanturilla 100,0 % RH. Porareikämittaustulosten ero 75 mm mittaussyvyydellä resistiivisiin valuantureihin oli keskimäärin 16,8 % RH ja kapasitiivisiin antureihin 10,3 % RH.

Silikonin vaikutus kapasitiivisiin antureihin saatiin selvitettyä. Silikonitiivistys laskee suhteellista kosteutta ja näin ollen vaikuttaa mittaustuloksiin laskevasti. Silikonitiivistämisen merkitys mittaustulokseen ei ole kuitenkaan suuri (< 4 % RH), ja mittaustuloksen havaittiin palaavan normaalilukemiin ajan kuluessa.

### 5.3 Kapasitanssineulat

Kapasitanssineulojen mittaustulokset on esitetty eri mittaussyvyyksiltä kaikkien koekappaleiden osalta (kuvat 5.11-5.13). Tulokset ovat kunkin koekappaleen kahden kapasitanssineulaparin keskiarvoja kustakin mittaussyvyydestä.

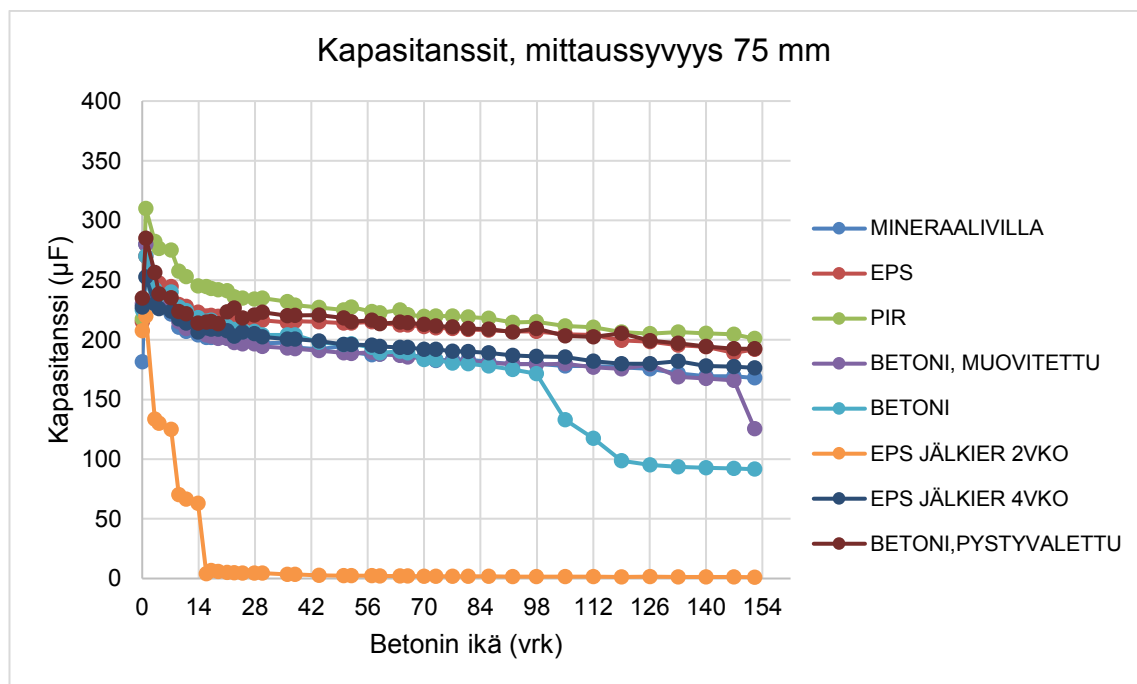


**Kuva 5.11** Kapasitanssimittaus, mittaussyvyys 25 mm

Koekappaleiden pintaosista mitatut kapasitanssit olivat heti valun jälkeen hyvin samankaltaisia keskenään. Pintaosien kapasitanssien keskiarvo oli 227 µF, maksimin ollessa 250 µF ja minimin 205 µF. Kapasitanssit laskivat mittausjaksolla tasaisesti, kunnes kapasitanssin arvoon tuli yhtäkkinen nopea lasku. Lasku alkoi kappaleissa kapasitanssin saatutetta n. 150...180 µF arvon.

Pintaosien kapasitansseja kokonaisuudessa vertailtaessa koekappaleryhmästä erottuu 28 vrk kohdalla jälkieristetty kappale ja pystyvalettu kappale. Näissä kyseisissä kappaleissa kappaleen valusuunta on ollut poikkeuksellinen muihin kappaleisiin nähden, ja tämä tekijä selittää muista kappaleista erottumisen. Kun valettu pinta on ollut ensimmäisen 24 h suljettuna, se estää veden haihtumisen ja samalla mahdollistaa hydratoitumisen etene-  
misen pidemmälle. Tästä syystä kyseisten mittapisteiden kohdalla betoni on oletettavasti tiiviimpää ja sisältää enemmän vettä, jolloin myös kapasitanssin arvo on suurempi.

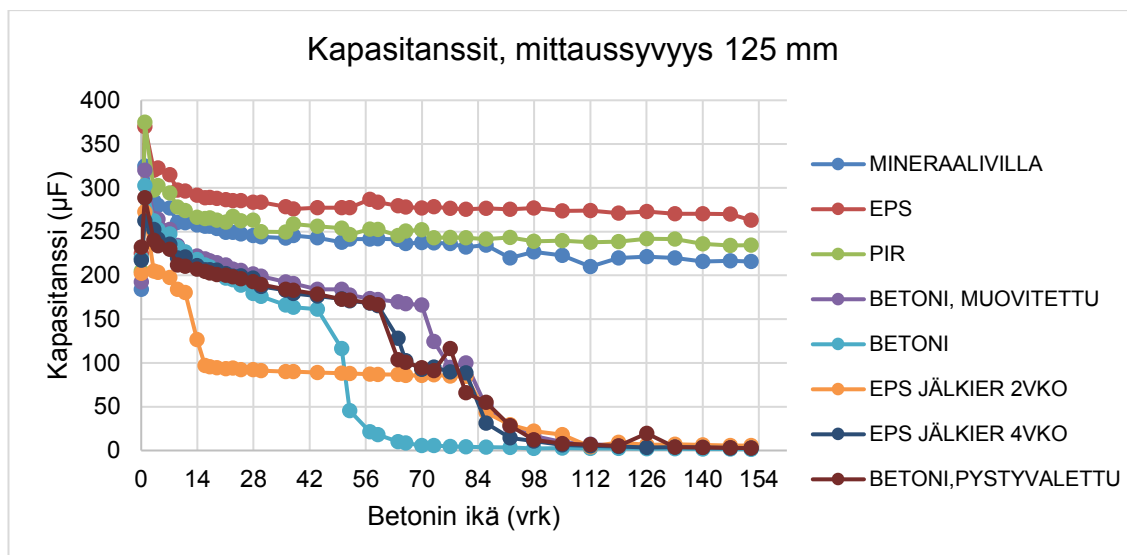
Pintaosien kapasitanssien arvoja vertailtaessa tulokset ovat linjassa kuivumisteorian kanssa. Pinnat kuivuvat hyvin samankaltaisesti toisiinsa verrattuna, kun pintojen käsittely on samanlainen.



**Kuva 5.12** Kapasitanssimittaus, mittaussyvyys 75 mm

Koekappaleiden betonin keskiosassa kapasitanssien mittaustulokset olivat koko tarkastelujakson hyvin samankaltaisia keskenään. Tarkastelujaksolla kapasitanssin suurta laskua ei havaittu muissa koekappaleissa kuin betonikappaleessa ja toisessa jälkieristetyistä kappaleista. EPS-eristeellä 14 vrk kohdalla jälkieristetty kappale erottuu joukosta hyvin selkeästi, mikä herättää epäilyksen kyseisen kappaleen kapasitanssineulamittauksen onnistumisesta.





**Kuva 5.13** Kapasitanssimittaus, mittaussyvyys 125 mm

Kapasitanssit koekappaleiden eristepinnassa (tai eristämättömien kappaleiden valun alapinnassa) vaihtelivat kapasitanssien osalta toisiinsa verrattuna eniten. Kaikkien valusta asti eristettyjen kappaleiden kapasitanssin arvo on koko tarkasteluajan suurempi kuin eristämättömillä kappaleilla.

Jälkieristettyjen koekappaleiden kapasitanssiarvot ovat eristyshetkeen saakka samankaltaisia muiden valussa eristämättömien koekappaleiden kapasitanssiarvojen kanssa. Eristäminen vaikuttaa hidastavan kapasitanssin laskunopeutta eristyshetkestä lähtien, mutta kapasitanssin arvo ei kuitenkaan eristämisen vaikutuksesta nouse.

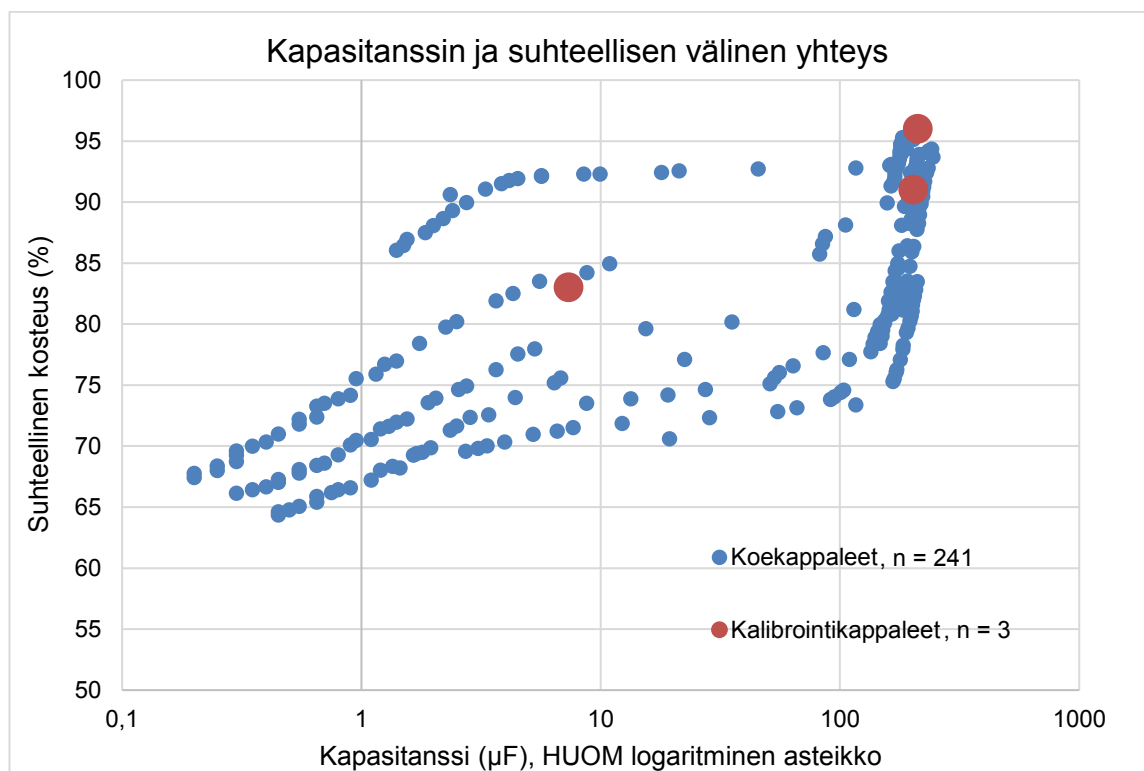
Kaikissa mittauspisteissä kapasitanssin arvo nousi ensimmäisen vuorokauden aikana. Ensimmäisen vuorokauden mittauks tulokset olivat keskiarvollisesti 60 µF suurempia kuin heti valun jälkeen mitatut arvot. Tähän ilmiöön voi olla selityksenä betonin hydratoitumisen aiheuttama lämpötilan nousu yhdistettynä koekappaleen huokosverkon tiivistymiseen. Kapasitanssiarvoissa havaitaan vastaavasti nopea lasku ensimmäisen vuorokauden jälkeen, jolloin huokosverkko jatkaa vielä tiivistymistään, mutta koekappaleen lämpötila laskee verrattain nopeasti.

Koekappalejoukosta kapasitanssien osalta erottui selkeästi 14 vuorokauden kohdalla EPS-jälkieristetty kappale, jonka kaikissa mittaussyvyyksissä kapasitanssien arvot olivat muuta koekappaleryhmää pienempiä. Koska kuivumisteorian mukaan kyseisen koekappaleen ei pitäisi kuivua nopeammin kuin myöhemmin jälkieristetty kappale tai kokonaan eristämätön kappale, voidaan olettaa kyseisen kappaleen koejärjestelyssä olleen jokin muu kapasitanssia alentanut tekijä. Tutkimuksen esitesteissä havaittiin kapasitanssineulan pituuden nostamisen vaikuttavan kapasitanssin arvoa nostattavasti. Tästä syystä voidaan arvioida, että mikäli kapasitanssineulojen väliin jää betonivalussa täyttymättömiä

kohtia, kapasitanssin arvokin laskee. Koska kapasitanssimittaus perustuu väliaineen permittiivisyyteen ja koejärjestely on muutoin sama kuin muilla kappaleilla, ei poikkeavuuden syyksi käytännössä jää muuta vaihtoehtoa kuin väliaineen heikkolaatuisuus.

Kapasitanssin ja suhteellisen kosteuden välistä yhteyttä betonissa tutkittiin kappaleiden pinta-osissa olleiden kapasitiivisten anturien lukemien ja kalibrointikappaleiden avulla. Kuvassa 5.14 on esitetty mitatut kapasitanssilukemat ja niitä kullakin ajan hetkellä vastaanottaneet kapasitiivisten kosteusanturien näyttämät. Kapasitanssin ja suhteellisen kosteuden välinen yhteys vaikuttaa tutkimusdatan perusteella olevan olemassa, mutta hajonta mittauslukemien välillä on suuri. Vertailukoekappaleista (tai kalibrointikappaleista) mitatut kapasitanssilukemat vaikuttavat asettuvan muuhun tulosjoukkoon melko hyvin.

Betonin suhteellisen kosteuden ollessa yli 90 % RH, on vastaava kapasitanssin arvo pääosin suuri (yli 150  $\mu\text{F}$ ). Kun suhteellinen kosteus betonissa on 75-90 % RH esiintyy vastaavissa kapasitansseissa sekä suuria että pieniä arvoja riippuen tutkittavasta koekappaleesta. Suhteellisen kosteuden laskiessa betonissa alle 75 % RH:n on myös kapasitanssin arvo pääosin laskenut pieneksi (alle 50  $\mu\text{F}$ ).



**Kuva 5.14** Kapasitanssin ja suhteellisen kosteuden välinen vertailu

Ongelmana kapasitanssitulosten tulkinnassa on betonin epähomogeenisuus. Tämä vaikuttaa siten, että eri koekappaleissa betonin permittiivisyyden maksimi-arvo vaihtelee. Samalla eri kappaleissa yhtenäisen kapillaariverkoston katkeamisen ajankohta voi vaihdella. Nämä molemmat edellä mainitut tekijät mahdollisesti vaikuttavat kapasitanssin mittauslukemaan.

## 5.4 Puristuslujuus

Betonini puristuslujuuskoekappaleiden tulokset on koottu taulukkoon 5.2. Kappaleet 1-3 säilytettiin olosuhdehuoneessa ja kappaleet 4-6 säilytettiin vesiupotuksessa. Puristus tehtiin betonin ollessa 28 vrk ikäistä.

*Taulukko 5.2 Puristuskoekappaleiden puristuslujuus ja tiheys*

Kappale	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	K (MPa)	Vesiupotus
1	2324	43,6	Ei
2	2321	44,4	Ei
3	2311	44,4	Ei
4	2367	44,6	Kyllä
5	2370	45,0	Kyllä
6	2371	43,9	Kyllä

Vesiupotuksessa säilytettyjen kappaleiden puristuslujuuden keskiarvo oli 44,5 MPa ja olosuhdehuoneessa säilytettyjen kappaleiden lujuuden keskiarvo oli 44,2 MPa. Näin ollen eri säilytysolosuhteet eivät vaikuttaneet betonin lujuuteen kovinkaan merkittävästi (ero 0,7 %). Betonin tiheyden keskiarvo oli vesiupotetuilla kappaleilla 2370 kg/m<sup>3</sup> ja olosuhdehuoneessa säilytetyillä kappaleilla 2318 kg/m<sup>3</sup>. Vesiupotuksessa olleiden kappaleiden tiheys oli täten 2,2 % suurempi olosuhdehuoneessa säilytettyihin kappaleihin verrattuna.

Puristuskoekappaleiden puristuslujuus jäi tavoiteltua lujuutta pienemmäksi. Tavoiteltu lujuus oli K50, mutta todellisuudessa betoni jäi noin luokkaan K44. Siihen voi olla syynä betonointityön epäonnistuminen tai betonimassan vaatimusten täyttämättömyys. Toisaalta mitattu puristuslujuus täyttää reilusti minimivaatimuksen (K30), joka on kantavan betonielementin sisäkuorelle määritetty. Näin ollen tutkimuksessa käytetty betoni voidaan katsoa puristuslujuudeltaan kelvolliseksi ja siten tutkimukseen soveltuvaksi.

## 6. YHTEENVETO

### 6.1 Tulosten yhteenveto

Punnitustulosten perusteella voidaan päätellä sekä kokonaiskuivumisen, että kuivumisnopeuden koko tarkastelujaksolla olevan suurempaa mineraalivillalla eristetyllä kappaleella verrattuna solumuovieristettyihin kappaleihin. Solumuovieristeet hidastavat merkittävästi kuivumista eristepintaan päin. Tiiviin eristeen pinnalla oleva suurikin kosteuspitoisuus ei kuitenkaan välttämättä aiheuta haittaa rakennuksen sisäilmalle tai rakenteseen.

Mittaputkiin sijoitettujen kosteusantureiden tuloksista saadun tiedon perusteella koekappaleen pintaosan kuivumisella ja eristysmateriaalilla ei havaittu suurta eroa. Mitä lähempänä vapaata pintaa mittaukset suoritetaan, sitä lähempänä toisiaan on kaikkien betonirakenteiden suhteellinen kosteus. Syvemmällä koekappaleissa eri rakenteiden suhteellisissa kosteuksissa on todennäköisesti pintaosien mittaustuloksia suurempia eroja, mutta niitä ei tutkimuksessa saatu luotettavasti selvitettyä.

Pinnoituspäätöstä tehtäessä eristemateriaalin kosteustekniset ominaisuudet on otettava huomioon. Sisäkuoren pinnoittaminen vesihöyryä huonosti läpäisevällä pinnoitusmateriaalilla ei ole suositeltavaa solumuovieristeitä käytettäessä, sillä silloin rakenteen kuivuminen estetään molempiin suuntiin.

Porareikämittaus-, kapasitanssineulamittaus- ja tietyltä osin myös mittaputkimittaustulokset osoittavat koekappaleen valusuunnalla olevan merkitystä kappaleen kuivumisnopeuteen. Muottipinta kuivuu hitaammin kuin valussa vapaana ollut ja valun jälkeen hiottu pinta. Tämän tutkimuksen perusteella eristys onkin järkevämpää tehdä tiiviiseen pintaan eikä valussa vapaana olleeseen pintaan.

Silikonilla tiivistämisellä havaittiin olevan suhteellisen kosteuden mittaustuloksia laskeva vaikutus, mutta vaikutus ei ollut kovin suuri. Sen sijaan kosteusanturien jälkitarkistamisen merkitys havaittiin erittäin suureksi tulosten luotettavuutta arvioitaessa. Pienikin virhe tai poikkeama koejärjestelyssä voi muuttaa tuloksia erittäin paljon. Tästä syystä olisi järkevää käyttää useampia samanaikaisia mittauksia samalla mittaustekniikalla suoritettuna. Koska nyt oli käytössä vain yksi anturi kunkin kappaleen kussakin syvyydessä, ei anturia pitkien tasaantumisaikojen vuoksi haluttu vaihtaa, vaikka sen lukema olisikin vaikuttanut epäluotettavalta.

Kokonaisuutena tuloksista voidaan päätellä, että suhteellisen kosteuden mittaaminen rakenteesta luotettavasti on haastava tehtävä. Erityisesti jatkuvaan mittaukseen liittyvä epävarmuus kosteusmittarin toiminnasta asettaa suuren haasteen tutkimuksen tekemiseen.

Tästä syystä toistettavat pistemäiset mittaukset, joissa anturin toiminta voidaan varmistaa ennen mittausta ja nopeasti mittauksen jälkeen, vaikuttaa parhaalta mittausmenetelmältä. Muutokset betonin kuivuessa ovat hitaita, joten pistemäiset mittaukset voidaan pitkäkestoisessa koejärjestelyssä suorittaa esimerkiksi kuukauden välein. Alkuvaiheen kuivumisen seuraamiseksi mittauksia voi suorittaa tiheämmin.

## 6.2 Jatkotutkimustarpeet

Jotta voitaisiin luotettavasti tutkia tuoreen betonin kosteuspitoisuutta jatkuvana mittauksena, olisi sille tarpeen löytää oikea mittaustapa. Markkinoilla olevien valuun upotettavien anturien suurin ongelma on se, ettei niiden mittausvirheen tarkastaminen ole mahdollista anturin asentamisen jälkeen. Mikäli käytetään ainetta rikkovaa menettelyä, on tutkittava koekappale oltava verrattain suuri, jotta jatkuva koekappaleen häirintä ei muuta oleellisesti koekappaleen kosteusprofiilia. Suurten koekappaleiden vaatima tilantarve asettaa myös vaatimuksia niiden säilytystilalle.

Kapasitanssineulojen käyttö kosteusmittaukseen vaikuttaa mahdolliselta, joskaan tämän tutkimuksen tuloksista siihen ei saatu tarpeeksi selkeää aineistoa. Tämä johtui suurelta osin tutkimuksen pääasiallisena tutkimusmenetelmänä olleiden kapasitiivisten kosteusanturien pettämisestä suuremmissa mittaussyvyyksissä ja siitä johtunut suhteellisen kosteuden vertailuarvojen puute. Kapasitanssineulojen onnistunut käyttö betonin kosteusmittauksissa olisi kuitenkin taloudellisesta näkökulmasta erittäin järkevää.

Tässä diplomityössä ei diplomityön laajuuden vuoksi tehty laskennallisia tarkasteluja. Laskennallisia tarkasteluja on kuitenkin tarkoitus tehdä jatkotutkimuksena TTY:llä.

## 6.3 Tutkimuksen onnistuminen

Diplomityö osoittautui työmäärältään erittäin laajaksi tutkimuksen alkuvaiheessa tehdystä tarkasta rajauksesta huolimatta. Diplomityöhön sisällytettiin tutkimuksen edetessä monia alkuperäiseen tutkimussuunnitelmaan kuulumattomia osioita.

Tutkimuksessa oli tarkoitus selvittää erilaisilla materiaaleilla ja tavoilla eristetyn betonisen sisäkuorielementin kuivumista. Tätä tavoitetta ei tutkimuksessa saatu ristiriidattomasti selvitettyä useista eri mittausmenetelmistä huolimatta.

Tutkimuksen kannalta harmillista oli pääasiallisen tutkimusmenetelmän pettäminen. Se osoittaa kuitenkin, että jatkuvatoimisen kosteusmittauksen tekemiseen liittyy erittäin paljon epävarmuustekijöitä. Koska kosteusanturien lukemat eivät vaikuttaneet luotettavilta, siirtyi tutkimuksen pääpaino muiden tutkimusmenetelmien analysointiin sekä kapasitiivisten anturien toiminnan selvittämiseen. Anturien toiminnan selvittäminen on hyvin oleellista jatkotutkimusten tekemisen kannalta. Tutkimuksessa vertailtiin myös erilaisia kosteusmittausmenetelmiä, joista saatiin paljon tietoa.

Tutkimuksessa saatiin kerättyä paljon erilaista mittausdataa. Näitä tietoja voidaan hyödyntää TTY:n rakennusfysiikan tutkimusryhmässä tulevilla tutkimuksilla.

## LÄHTEET

Agilent, 2008. U1701A Dual Display Handheld Capacitance Meter. 14 p.

Betonikeskus, 2007. Betonirakenteiden ympäristöominaisuudet. Suomen Betonitieto Oy, Helsinki, 64 s.

Björkholtz, D., 1990. Rakennuksen kuivattaminen. Rakentajain kustannus Oy, Helsinki, 76 s.

Björkholtz, D., 1987. Lämpö ja kosteus: rakennusfysiikka. Rakentajain kustannus Oy, Helsinki, 159 s.

Cataldo, A., De Benedetto, E. & Cannazza, G., 2011. Broadband reflectometry for enhanced diagnostics and monitoring applications. Springer Science & Business Media, Lecce, 147 p.

Farahani, H., Wagiran, R. & Hamidon, M.N., 2014. Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: a comprehensive review. Sensors, 14(5), pp. 7881-7939.

Hagentoft, C., 2001. Introduction to building physics. Studentlitteratur, Lund, 422 p.

Laine K. 2010. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 122 + 32 s.

Leivo, V. & Rantala, J., 2002. Maanvastaisten alapohjarakenteiden kosteustekninen toimivuus. TTKK, Tampere, 106 + 13 s.

Leivo, V. & Rantala, J., 2000. Maanvaraisten alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytymisen. TTKK, Tampere, 124 s.

Ljungkrantz, C., Möller, G. and Petersons, N., 1994. Betonghandbok, material. Svensk Byggtjänst, Stockholm, 1127 p.

Lumme, P. & Merikallio, T., 1997. Betonin kosteuden hallinta. Suomen betonitieto Oy, Helsinki, 31 s.

Mannonen, P., 2006, Kestävä kivitalo. Suomen Betonitieto Oy, Helsinki, 182 s.

Mannonen, R., 2005. Betonitekniikan oppikirja 2004, by 201. Suomen Betoniyhdistys ry, Helsinki, 570 s.

Matemaattisten aineiden opettajien liitto MAOL RY, 2000. MAOL-taulukot. Helsinki 159 s.

Merikallio, T., 2009. Betonilattian "riittävän" kuivumisen määrittäminen uudisrakentamisessa, Väitöskirja, TKK, Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos, 136 s.

Merikallio, T., 2002. Betonirakenteiden kosteusmittaus ja kuivumisen arviointi, Rakennustieto, Helsinki, 58 s.

Merikallio, T., Niemi, S. & Komonen, J., 2007. Betonirakenteiden päällystämisen ohjeet. Helsinki: Suomen Betonitieto Oy, .

Nevander, L.E. & Elmarsson, B. (2009). Fukthandbok : praktik och teori, 3. utgåvan, 4. tryckningen Svensk byggtjänst, Solna, 538 s.

Ormiskangas, P., 2009. Betonisandwich-elementin kosteustekninen toiminta paksuilla eristeillä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere 127 + 7 s.

Pavlik, Z., Jiříčková, M., Černý, R., Sobczuk, H. & Suchorab, Z., 2006. Determination of moisture diffusivity using the time domain reflectometry (TDR) method. Journal of Building Physics, 30(1), pp. 59-70.

Pentti, M. & Hyypöläinen, T., 1999. Ulkoseinärakenteiden kosteustekninen suunnittelu. TTKK, Tampere, 150 + 40 s.

Pitkäranta, M., toim., 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus, Ympäristöopas 2016, Ympäristöministeriö.  
Saataavilla: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi>

Rakennustieto RT (2010). RT 14-10984 Betonin suhteellisen kosteuden mittausohjeet helmikuu 2010, 16 s.

RIL 107-2012, 2012, Rakennusten veden- ja kosteudeneristysohjeet.  
Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki, 219 s.

RIL 255-1-2014, 2014, Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, Helsinki, 500 s.

Roels, S., Carmeliet, J., Hens, H., Adan, O., Brocken, H., Cerny, R., Pavlik, Z., Ellis, A.T., Hall, C. & Kumaran, K., 2004. A comparison of different techniques to quantify moisture content profiles in porous building materials. Journal of Thermal Envelope and Building Science, 27(4), pp. 261-276.

Rotronic, 2016. HygroClip 2 (HC2) Humidity Temperature Probes: User Guide.

Suomen rakentamismääräyskokoelma (RakMk) (1998). Osa C2 Kosteus, Määräykset ja ohjeet, 16 s.

Suomen rakentamismääräyskokoelma (RakMk) (2011). Osa D3 Energiatohokkuus, Määräykset ja ohjeet, 35 s.

Suomen virallinen tilasto (SVT): Korjausrakentaminen [verkkojulkaisu]. ISSN=1799-2958, Rakennusyritysten korjaukset 2015, Liitetaulukko 3. Asuinrakennusten ja asuntojen korjaukset, miljoonaa euroa . Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 3.4.2017].



Saantitapa: [http://www.stat.fi/til/kora/2015/01/kora\\_2015\\_01\\_2016-08-29\\_tau\\_003\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/kora/2015/01/kora_2015_01_2016-08-29_tau_003_fi.html)

Van Bellegheem, M., Steeman, M., Janssen, H., Janssens, A. and De Paepe, M., 2014. Validation of a coupled heat, vapour and liquid moisture transport model for porous materials implemented in CFD. *Building and Environment*, 81, pp. 340-353.

Viirola, H. & Raivio, P., 2000. Portlandsementin hydrataatio. VTT Tiedotteita 2041, VTT, valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 61 s.

Viitanen, H., 2004. Betonin ja siihen liittyvien materiaalien homehtumisen kriittiset olosuhteet - betonin homeenkesto. VTT Working papers 6, VTT, valtion teknillinen tutkimuskeskus, Espoo, 25 s.

Vinha, J., 2011. Luentomoniste 2011 Osa 2. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, 246 s.

Vinha, J., 2008. Rakennusten rakennusfysikaalisen suunnittelun ja rakentamisen periaatteet. *Rakentajain kalenteri 2009*, s 362-381.

Vinha, J., Laukkarinen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J. & Köliö, A., 2013. Ilmastomuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti; 159.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. and Käkelä, P., 2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan osasto, Talonrakennustekniikan laboratorio, Tutkimusraportti; 129.

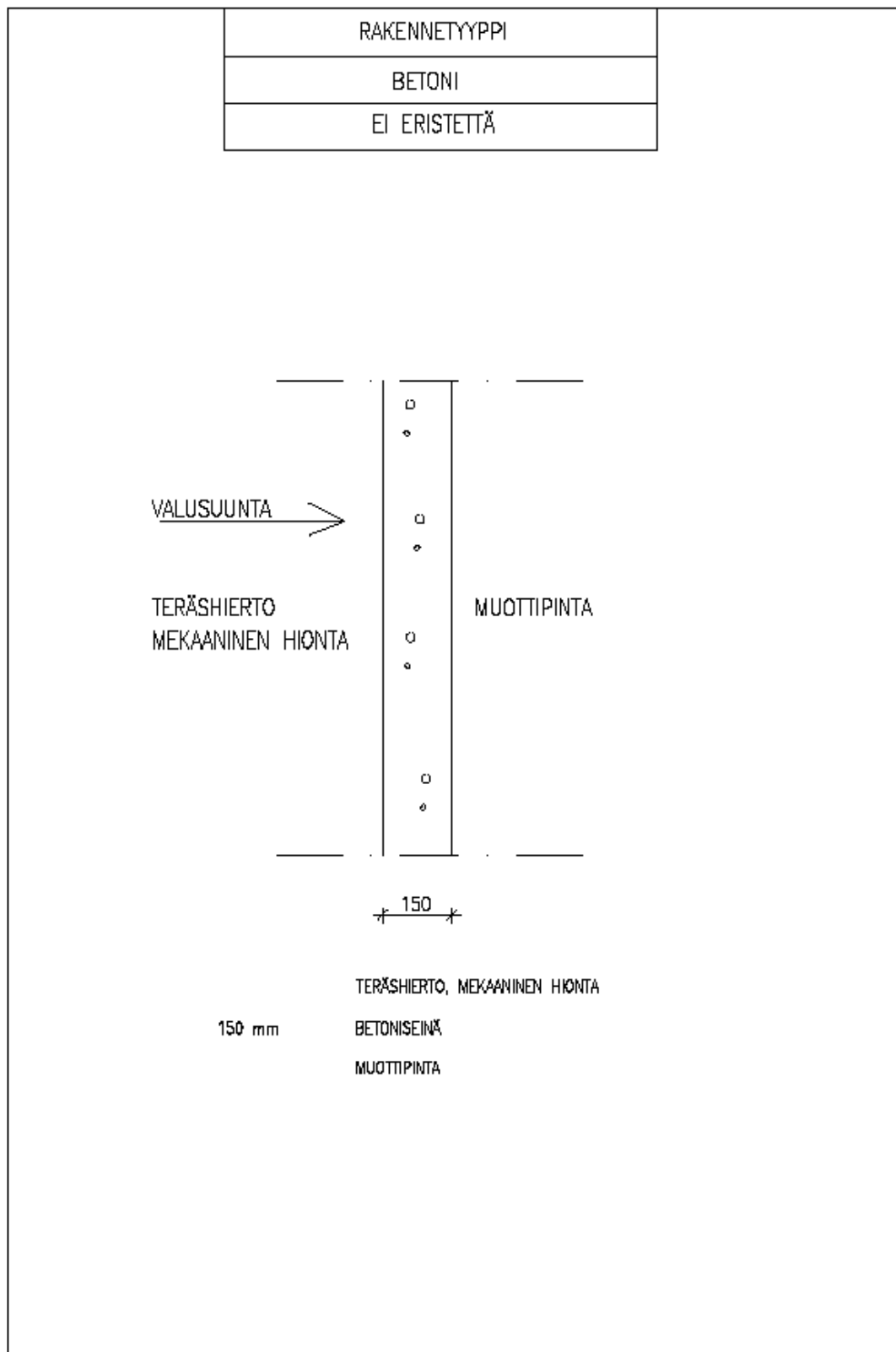
## **LIITTEET**

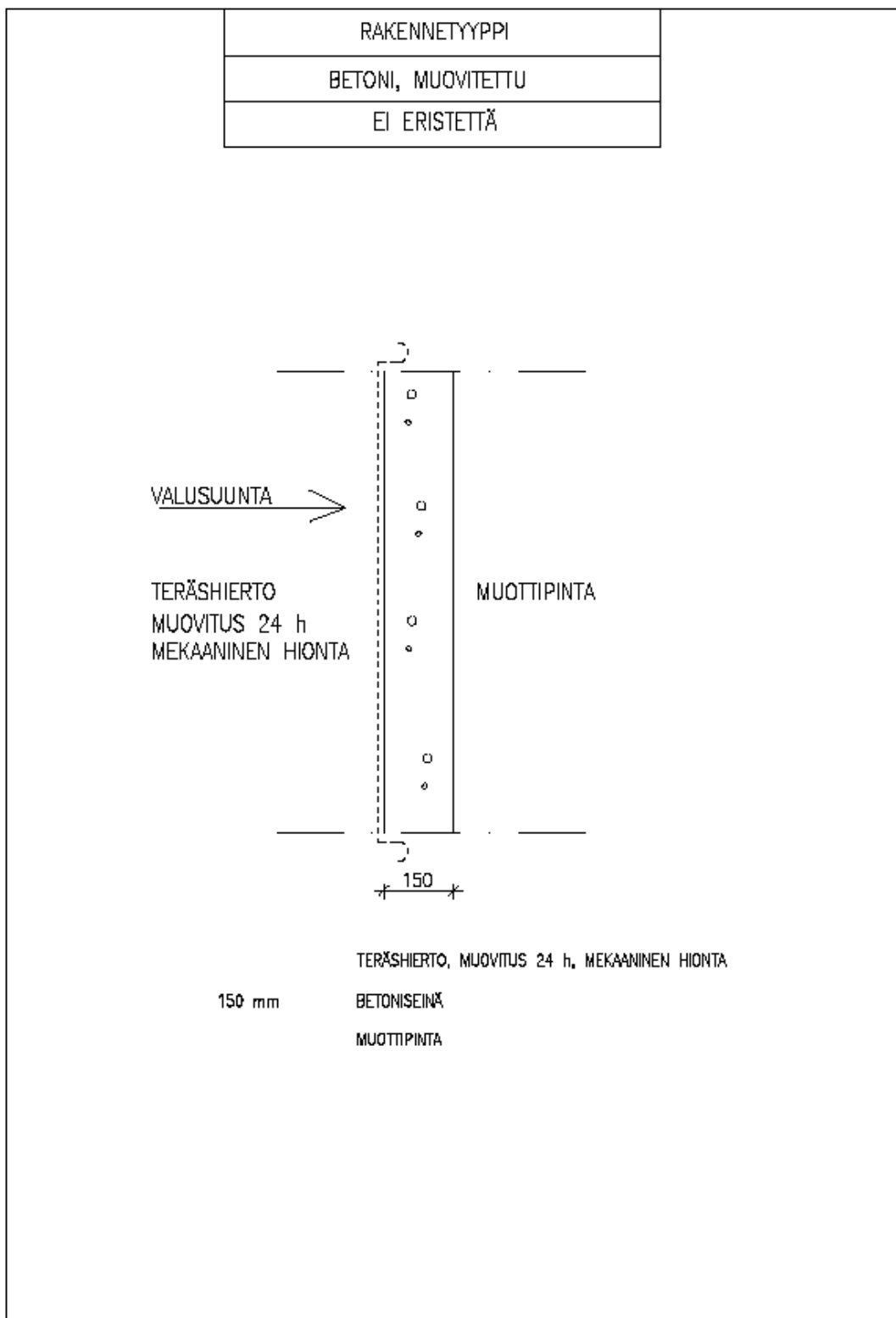
Liite A: Koekappaleiden rakennetyypit 8 s.

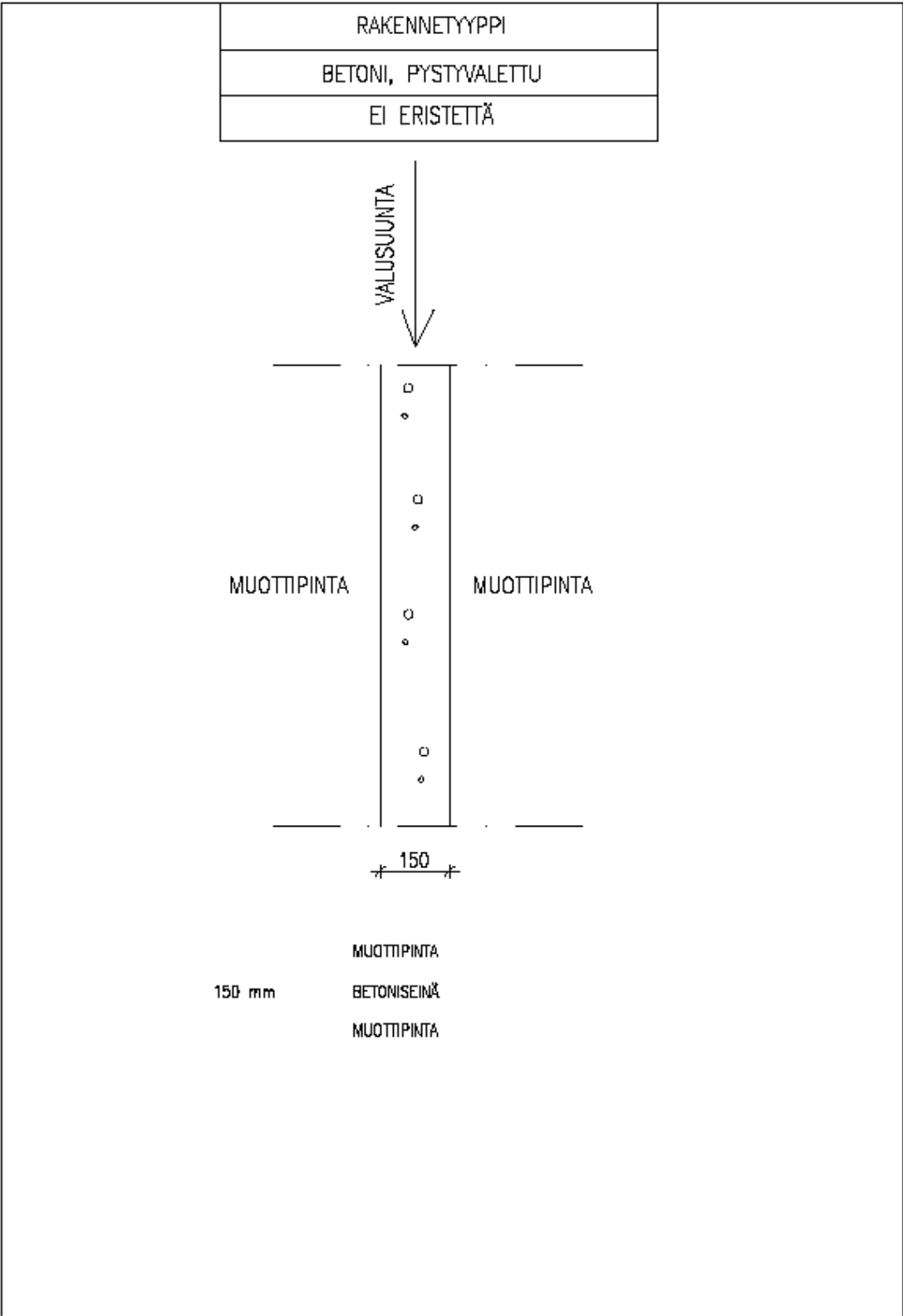
Liite B: Kapasitiivisten kosteusantureiden kalibrointitulokset 1 s.

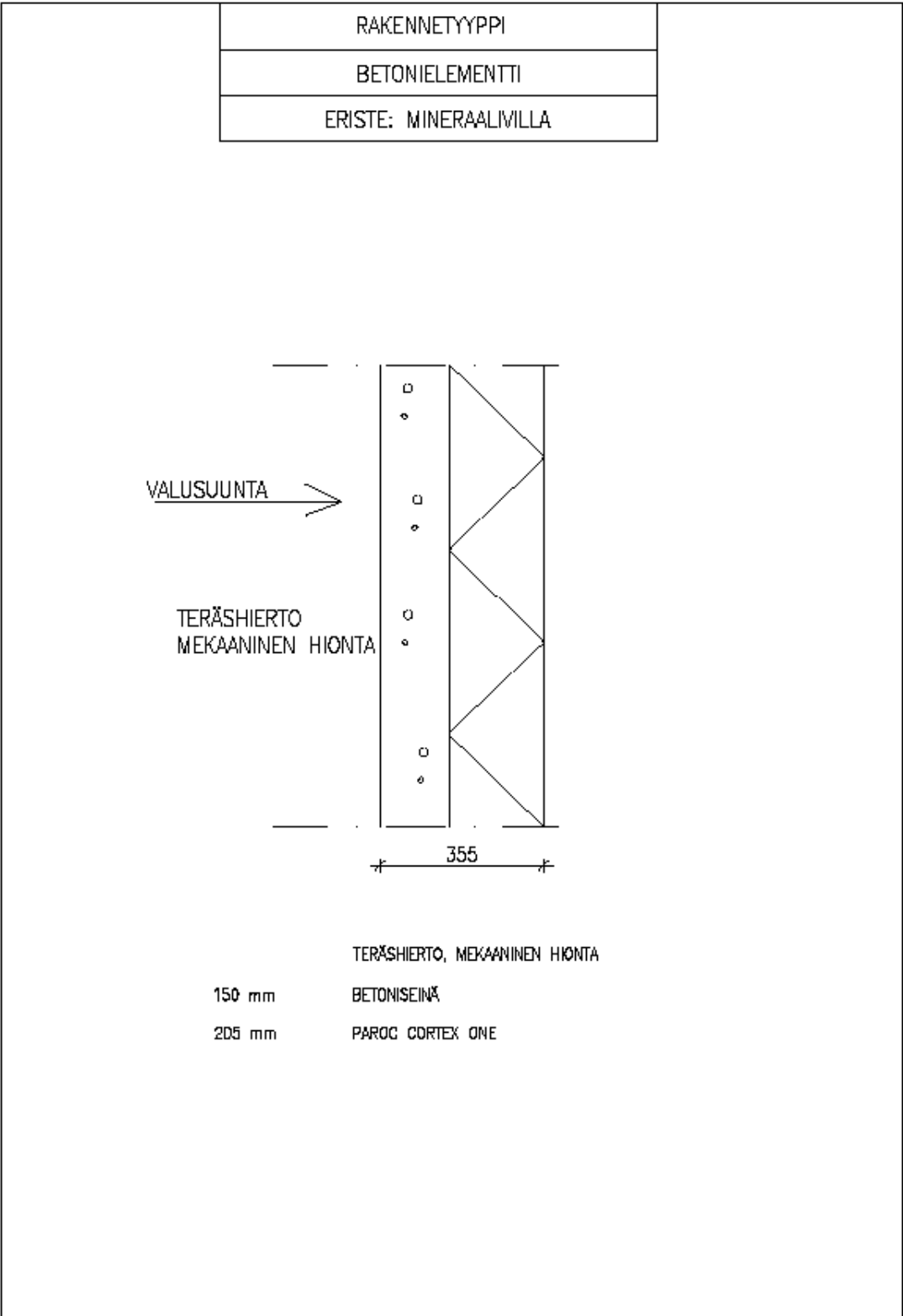
Liite C: Kapasitiivisten kosteusantureiden mittaustulokset 2 s.

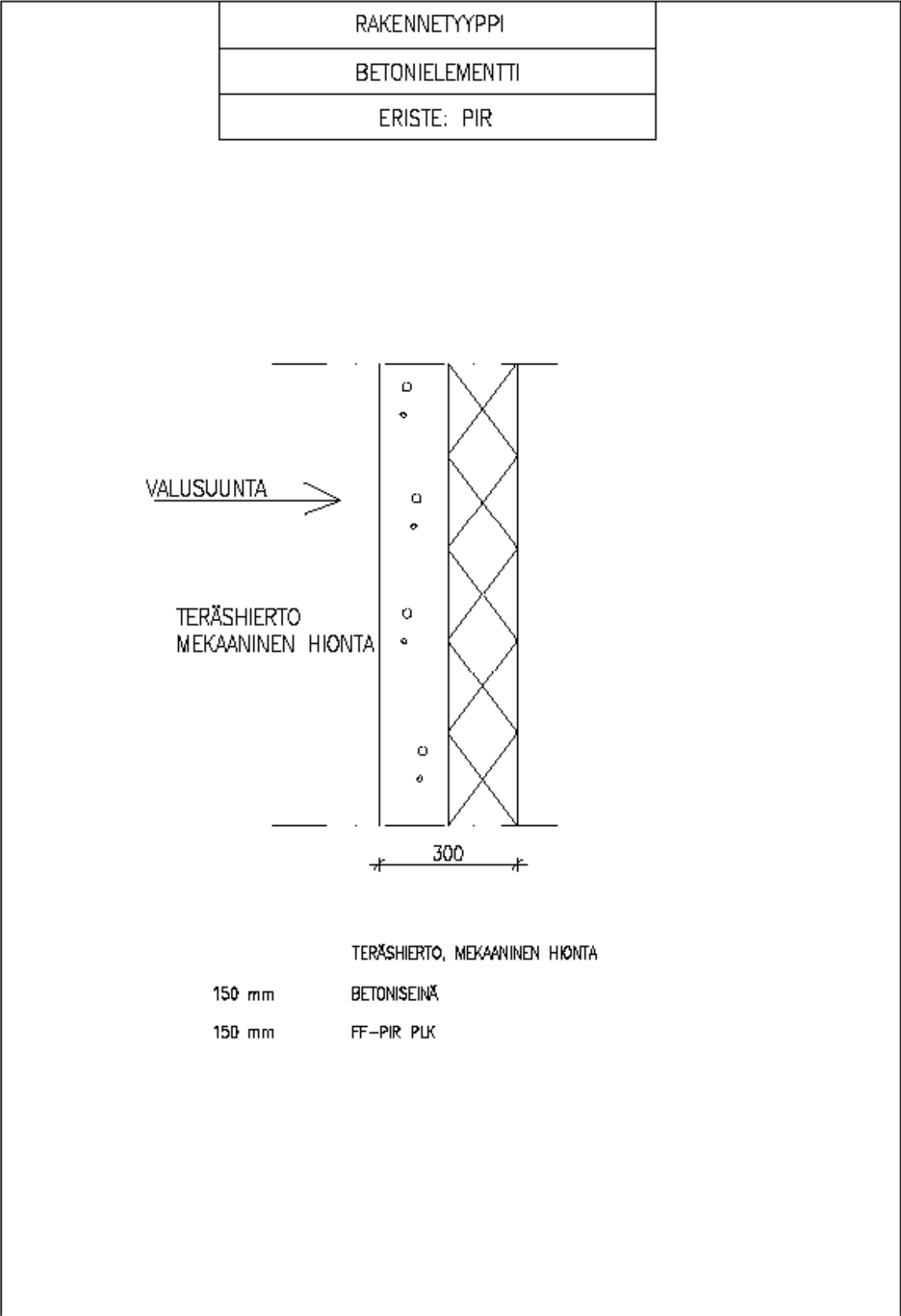
**Liite A: Koekappaleiden rakennetyypit**



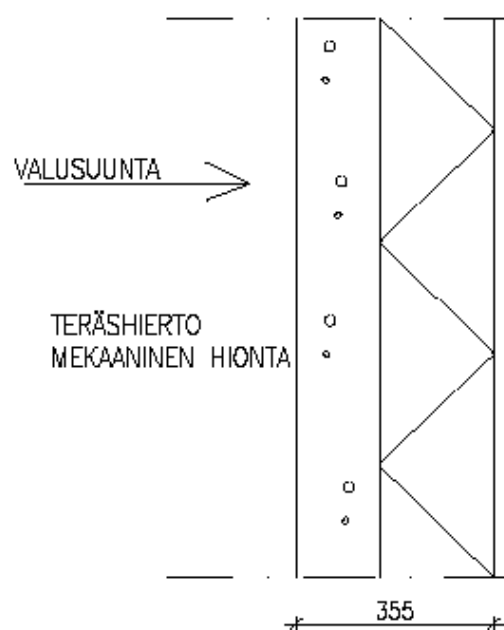








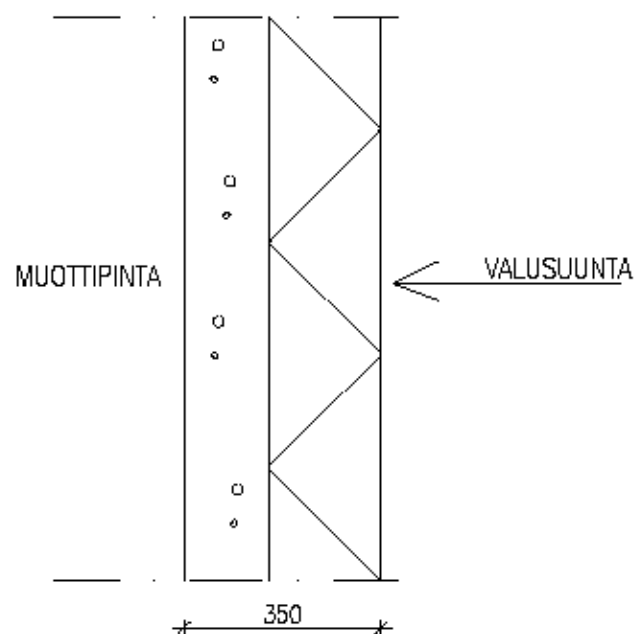
RAKENNETYYPPI
BETONIELEMENTTI
ERISTE: MINERAALIVILLA



	TERÄSHIERTO, MEKAANINEN HIONTA
150 mm	BETONISEINÄ
205 mm	PAROC CORTEX ONE

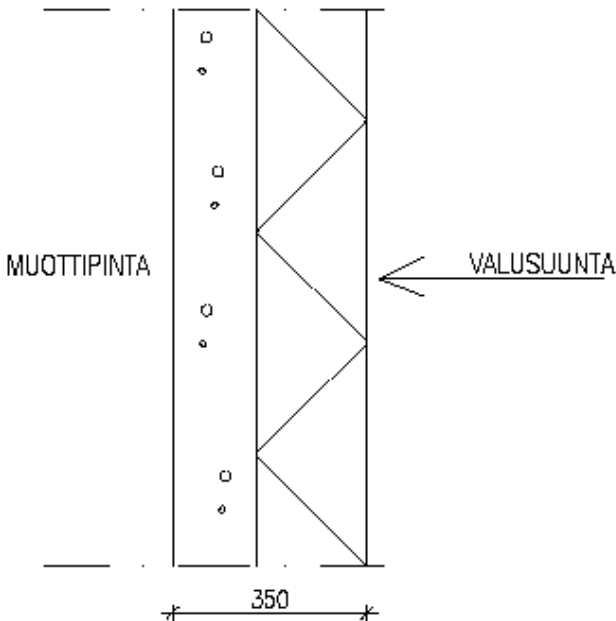


RAKENNETYYPPI
BETONIELEMENTTI
ERISTE: EPS, JÄLKIERISTYS 14 VRK



	MUOTTIPINTA
150 mm	BETONISEINÄ
200 mm	FF-EPS 60S, JÄLKIERISTYS 14 VRK VALUN JÄLKEEN

	RAKENNETYYPPI	
	BETONIELEMENTTI	
	ERISTE: EPS, JÄLKIERISTYS 28 VRK	



	MUOTTIPINTA	
150 mm	BETONISEINÄ	
200 mm	FF-EPS 6DS, JÄLKIERISTYS 28 VRK VALUN JÄLKEEN	

**Liite B: Kapasitiivisten kosteusanturien kalibrointitulokset**

**Koekappaleiden pintaosien kosteusanturit**

<b>Anturi</b>	<b>EPS (24mm)</b>	Tarkastuksen RH			
		96 %	85 %	59 %	33 %
		± 3	± 3	± 3	± 3
		+2,56	+0,68	-0,34	-0,63
<b>Anturi</b>	<b>Mineraalivilla (23 mm)</b>	Tarkastuksen RH			
		96 %	85 %	59 %	33 %
		± 3	± 3	± 3	± 3
		+1,07	-0,05	-0,62	-0,92
<b>Anturi</b>	<b>PIR (24 mm)</b>	Tarkastuksen RH			
		96 %	85 %	59 %	33 %
		± 3	± 3	± 3	± 3
		+1,64	+0,64	+0,03	+0,39
<b>Anturi</b>	<b>Betoni (18 mm)</b>	Tarkastuksen RH			
		96 %	85 %	59 %	33 %
		± 3	± 3	± 3	± 3
		+1,17	+0,01	-0,14	+0,21
<b>Anturi</b>	<b>Pystyvalettu (27 mm)</b>	Tarkastuksen RH			
		96 %	85 %	59 %	33 %
		± 3	± 3	± 3	± 3
		+1,41	-0,5	-0,65	-0,26
<b>Anturi</b>	<b>Muovitettu (22 mm)</b>	Tarkastuksen RH			
		96 %	85 %	59 %	33 %
		± 3	± 3	± 3	± 3
		-0,02	-0,33	-0,94	0,21
<b>Anturi</b>	<b>EPS jälkieristys 14 vrk (25 mm)</b>	Tarkastuksen RH			
		96 %	85 %	59 %	33 %
		± 3	± 3	± 3	± 3
		+3,14	-0,27	-0,84	-0,40
<b>Anturi</b>	<b>EPS jälkieristys 28 vrk (27 mm)</b>	Tarkastuksen RH			
		96 %	85 %	59 %	33 %
		± 3	± 3	± 3	± 3
		+3,83	+3,72	+0,28	-0,33

**Liite C: Kapasitiivisten kosteusanurien kalibrointitulokset**

